

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marina Prolić**

**Split, 2017.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Marina Prolić**

**Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva poroznih  
betona**

**Diplomski rad**

**Split, 2017.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

**KANDIDAT:** Marina Prolić

**BROJ INDEKSA:** 592

**KATEDRA:** Katedra za građevinske materijale

**PREDMET:** Građevinski materijali I

## **ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva poroznih betona

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti svojstva poroznog betona, kao i dosadašnja ispitivanja i uporabu ove vrste betona. Na temelju prethodnih istraživanja potrebno je odabrati neke recepture te u eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi uzorke betona u kojima će se dio cementa zamijeniti sa mineralnim dodatkom. Svi uzorci trebaju imati isti vodocementni faktor, a količina veziva treba biti konstantna. Na uzorcima svježeg betona potrebno je ispitati konzistenciju metodom slijeganja i „metodom kuglice“, a na uzorcima očvrslog betona poroznost, propusnost, vlačnu čvrstoću metodom cijepanja te čvrstoću na pritisak. Za određivanje propusnosti betona treba koristiti dvije metode: metodu padajuće razine stupca vode i metodu stalne razine stupca vode. Dobivene rezultate potrebno je usporediti s rezultatima iz prethodnog istraživanja.

U Splitu, 17.03.2017.

Voditelj Diplomskog rada:

Izv. prof. dr. sc. Sandra Juradin

Predsjednik Povjerenstva

za završne i diplomske ispite:

Prof. dr. sc. Veljko Srzić

## **ZAHVALA**

---

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Sandri Juradin na iskazanom povjerenju, vodstvu i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Velika hvala mom zaručniku na strpljenju i podršci tijekom studiranja te pomoći prilikom izrade ovog rada.

Najveća hvala mojim roditeljima koji su mi omogućili studiranje i što su sve ove godine bili uz mene, podržavali me te pokazali neizmjereno razumijevanje i ljubav.

Hvala vam svima!

# Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva poroznih betona

## ***Sažetak:***

Porozni beton je posebna vrsta betona koja se koristi prvenstveno kod izgradnje kolnika. Zahvaljujući njemu, moguće je smanjiti otjecanje oborinskih voda, pohranjivati oborinske vode te na taj način osigurati dodatnu infiltraciju, poboljšati kvalitetu oborinskih voda i slično. Cilj ovog istraživanja je ispitati svojstva poroznog betona s mineralnim dodacima te ih usporediti s prethodnim istraživanjima. Izrađeno je osam mješavina poroznog betona. Ispitana su i analizirana sljedeća svojstva: konzistencija, poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća te vlačna čvrstoća cijepanjem. U ovom istraživanju se nastojalo izraditi optimalnu mješavinu poroznog betona s mineralnim dodacima koja bi imala zadovoljavajuću čvrstoću i propusnost.

## ***Ključne riječi:***

Porozni beton, mineralni dodaci, poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća cijepanjem

# **The impact of the mineral admixtures on the properties of porous concrete**

## ***Abstract:***

Porous concrete is a special type of concrete that is primarily used for the construction of the roadway. Thanks to this kind of concrete, it is possible to reduce the rainwater run-off, to store the rainwater run-off and by that ensure the additional infiltration, to increase the quality of the rainwater run-off, etc. The aim of this study is to examine the properties of porous concrete with the mineral admixtures and to compare them with the previous studies. Eight mixtures of porous concrete were made. They were tested and analyzed by the following characteristics: consistency, porosity, permeability, compressive strength and tensile strength by splitting. In this study, there was an attempt to make an optimal mixture of porous concrete with the mineral admixtures which would have sufficient strength and permeability.

## ***Keywords:***

Porous concrete, mineral admixtures, porosity, permeability, compressive strength and tensile strength by splitting.

## Sadržaj

1	UVOD.....	1
1.1	Općenito o betonu .....	1
1.2	Osnovne komponente betona .....	2
1.2.1	Portland cement.....	2
1.2.2	Hidratacija cementa .....	3
1.2.3	Agregat .....	3
1.2.4	Osnovni uvjeti kvalitete agregata.....	4
1.2.5	Fizikalna svojstva agregata .....	4
1.2.6	Poroznost i apsorpcija vode .....	5
1.2.7	Granulometrijski sastav agregata.....	6
1.2.8	Voda .....	6
1.2.9	Voda za njegovanje betona .....	7
1.3	Općenito o poroznom betonu.....	7
1.4	Povijesni razvoj poroznoga betona .....	10
1.5	Porozni betonski kolnici .....	10
2	DODACI.....	13
2.1	Ljuske riže .....	13
2.2	Silicijska prašina.....	14
2.2.1	Proizvodnja silicijskih i ferosilicijskih legura .....	14
2.3	Leteći pepeo .....	17
3	DOSADAŠNJA ISPITIVANJA POROZNOG BETONA UZ DODATAK ADITIVA .....	20
3.1	Istraživanja o djelomičnoj zamjeni cementa u poroznom betonu(Manoj Nallanathel, B. Ramesh, Srikanth S).....	20
3.1.1	Sažetak .....	20
3.1.2	Uvod .....	20
3.1.3	Zaključak.....	28
3.2	Eksperimentalno ispitivanje mineralnih aditiva u poroznom betonu: pregled(Prof. dr. K. B. Parikh, M. A. Shaikh, Adil A. Haji).....	30
3.2.1	Sažetak .....	30
3.2.2	Uvod .....	30
3.2.3	Mineralni aditivi .....	30
3.2.4	Porozni beton .....	31
3.2.5	Mineralni aditivi u betonu: leteći pepeo .....	32
3.2.6	Zaključak.....	34

3.3	Eksperimentalno istraživanje o djelomičnoj zamjeni cementa s pepelom palme u betonu (K. Sathish Kumar, S. Dilli Babu) .....	35
3.3.1	Sažetak .....	35
3.3.2	Uvod .....	35
3.3.2	Svojstva materijala .....	36
3.3.3	Kemijski sastav .....	36
3.3.4	Uzorci.....	36
3.3.5	Zaključak.....	43
3.4	Utjecaj sastava i načina ugradnje na svojstva poroznih betona (I.Brnas).....	44
3.4.1	Uvod .....	44
3.4.2	Korišteni materijali .....	44
3.4.3	Proračun sastava poroznog betona.....	44
3.4.4	Rezultati ispitivanja poroznosti .....	46
3.4.5	Rezultati ispitivanja propusnosti .....	47
3.4.6	Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće .....	48
3.4.7	Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće.....	48
3.4.8	Zaključak.....	49
4	Eksperimentalni dio.....	50
4.1	Korišteni materijali .....	51
4.1.1	Cement .....	51
	Preporuke za transport i skladištenje.....	53
4.1.2	Agregat .....	53
4.1.3	Voda .....	55
4.1.4	Silicijska prašina.....	55
4.1.5	Leteći pepeo .....	56
4.2	Izrada mješavina poroznog betona .....	57
4.3	Ugradnja mješavina u kalupe .....	66
4.4	Metode ispitivanja poroznog betona .....	67
4.4.1	Ispitivanje konzistencije .....	67
4.4.2	Ispitivanje poroznosti .....	68
4.4.3	Ispitivanje propusnosti.....	69
4.4.4	Metoda padajuće razine stupca vode .....	70
4.4.5	Metoda stalne razine stupca vode .....	71
4.4.6	Ispitivanje tlačne čvrstoće .....	72



4.4.7	Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem .....	74
4.5	Izrada probnih porozno-betonskih ploča .....	75
4.5.1	Ispitivanje brzine infiltracije probnih ploča prema ASTM C 1701 .....	77
5	Rezultati i analize rezultata ispitivanja .....	80
5.1	Rezultati ispitivanja konzistencije betona .....	80
5.2	Rezultati ispitivanja svojstava poroznog betona u očvrsлом stanju .....	86
5.2.1	Ispitivanje poroznosti .....	86
5.2.2	Rezultati ispitivanja propusnosti .....	93
5.2.3	Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće .....	96
5.2.4	Vlačna čvrstoća cijepanjem .....	99
5.2.5	Rezultati ispitivanja brzine infiltracije probnih ploča .....	101
6	Ovisnosti između svojstava poroznog betona.....	104
6.1	Veza između tlačne čvrstoće i poroznosti .....	104
6.2	Veza između vlačne čvrstoće cijepanjem i poroznosti .....	104
6.3	Veza između poroznosti i propusnosti .....	105
6.4	Veza između tlačne i vlačne čvrstoće cijepanjem .....	106
6.5	Veza između vodovezivnog faktora i poroznosti .....	107
7	ZAKLJUČAK .....	108
8	LITERATURA.....	110

# 1 UVOD

## 1.1 Općenito o betonu

Beton je mnogokomponentni, polidisperzni, umjetni kameni građevinski materijal koji je sastavljen od pijeska i krupnog agregata, međusobno povezanih cementnim kamenom, nastalim hidratacijom i očvršćivanjem cementa kao veziva. Od otkrića betona pa do današnjih dana beton je zauzeo prvo mjesto kao vodeći materijal u građevinarstvu. Koristi se kod izgradnje mostova, zgrada, hidrotehničkih, prometnih te industrijskih objekata. [1]

Proces proizvodnje, kao i ugradnja samog betona, dosta je jednostavna i brza. Još jedna odlika betona je to što se on ugrađuje u tečnom stanju te dozvoljava izradu raznih oblika konstruktivnih elemenata. Kao i svi ostali materijali tako i beton ima niz prednosti i niz nedostataka.

Prednosti betona su:

- postojanost u svim klimatskim uvjetima,
- dug vijek trajanja,
- negorivost,
- relativno mali troškovi proizvodnje,
- mogućnost modeliranja raznih oblika,
- velika tlačna čvrstoća,
- jednostavna proizvodnja,
- dostupnost sastojaka (cement, pijesak, voda, dodaci).

Najveći nedostaci betona su:

- relativno velika zapreminska masa koja se kreće za normalne betone od  $2000 \text{ kg/m}^3$  pa do  $2800 \text{ kg/m}^3$ ,
- potrebna izrada teške oplata (kalupa),
- velika provodljivost topline,
- relativno mala vlačna čvrstoća.

Svojstva betona ovise o karakteristikama cementa, omjeru mase vode i cementa (v/c-vodocementni faktor), količini cementa, kvaliteti agregata te o zrelosti betona. [2]

## **1.2 Osnovne komponente betona**

### **1.2.1 Portland cement**

Cement je praškasti materijal, koji u dodiru s vodom, kemijskim reakcijama i pratećim fizikalnim procesima prelazi u očvrslu cementnu pastu ili cementni kamen. Time postepeno razvija svoja kohezijska i adhezijska svojstva, koja omogućavaju da poveže zrna stijena i minerala u kontinuiranu, čvrstu masu betona. Postoji veliki broj vrsta cementa, a najčešće se u građevinarstvu upotrebljava portland cement. Važnije vrste cementa su još: aluminatni cement, pucolanski i metalurški cement, ekspanzivni cement i supersulfatni cement.

Portland cement je hidrulični cement proizveden mljevenjem klinkera, koji sačinjavaju uglavnom hidraulični kalcij, silikati različitih formi, uz istovremeno mljevenje i homogenizaciju s dodatkom kalcij sulfat dihidrata ili anhidrita.

Proces proizvodnje portland cementa u principu je jednostavan. Najprije se vapnenac i glina usitne i homogeniziraju u vodi u obliku mulja (mokri postupak) ili se mješavina samljevenih osnovnih sastojaka transportira u struji zraka (suhi postupak). Tako homogenizirana mješavina uvodi se na početak dugačke, blago nagnute rotacijske peći. Mješavina se postepeno zagrijava kako napreduje prema drugom kraju peći, najprije voda ishlapi pa se vapnenac razgradi na vapno i ugljični dioksid. Konačno dolazi do sintetiziranja pri temperaturi od 1400°C, a mješavina prelazi u kalcij silikate i kalcij aluminat i manji dio u druge spojeve. Tako nastane cementni klinker, veličine granula od 3 do 25 mm koji se nakon izlaska iz rotacijske peći hladi i uskladišti. Klinker se zatim, uz dodatak gipsa, melje i time istovremeno homogenizira u sitnu prašinu, portland cement. Gips se dodaje uglavnom radi sprječavanja trenutnog vezanja.

Proizvodnja jedne moderne rotacijske peći je 6 000 tona klinkera dnevno. Potrošnja cementa u razvijenim zemljama je reda veličine 500 kilograma po stanovniku godišnje, dok je u zemljama s vrlo intenzivnom izgradnjom oko 2 tone po stanovniku godišnje. [3]



*Slika 1.1 Portland cement [4]*

### **1.2.2 Hidratacija cementa**

Odmah nakon što se zamiješaju cement i voda, počinje proces hidratacije, tj. molekule vode obavijaju ione čvrstih čestica cementa i na taj način omogućavaju njihovo bolje sređivanje u novonastale gel i kristalne strukture. Tim procesom silikati i aluminati formiraju produkte hidratacije ili hidrate, a zamiješana, plastična cementna pasta prelazi postepeno u očvrslu, hidratiziranu cementnu pastu.

U cementu, kalcij silikati,  $C_3S$  i  $C_2S$ , sadrže manje količine nečistoća i kao takvi nazivaju se alit i belit. Cementi s većom količinom alita (alitni cementi) hidratiziraju brže, dok belitni cementi hidratiziraju sporije. [3]

### **1.2.3 Agregat**

Agregat čini približno tri četvrtine volumena betona pa je razumljivo da ima veliki utjecaj na svojstva svježeg i očvrslog betona.

Agregati za beton mogu se podijeliti na prirodne i umjetne. Prirodni agregati mogu se proizvesti: 1) iz vučenog nanosa, koji se formira procesima erozije raznih vrsta stijena i 2) drobljenjem iz velikih komada prirodnih stijena. Većina svojstava agregata ovisi o svojstvima izvorne stijene i o postupku usitnjavanja. Umjetni agregati se obično proizvode za neku posebnu namjenu, kao što je npr. lakoagregatni beton. To su agregati od ekspandirane i pečene gline ili škriljca, perlita i vermikulita. Krupna zrna agregata čine skelet betona preko kojega se, radi znatno veće krutosti od krutosti cementnog kamena, prvenstveno prenose sile. Sitna zrna zajedno s cementnom pastom čine mort. Obično se uzima da je granica između pijeska i krupnog agregata kod zrna veličine 4 mm jer je ta granica najčešće usvojena u proizvodnji frakcija agregata.

Zrnca veličine između 0,06 i 0,02 mm klasificiraju se kao kamena prašina (silt), a sitnije čestice od 0,02 mm su glina. Krupnija zrna agregata se u proizvodnji dijele u frakcije zato da tijekom transporta ne bi dolazilo do nepovoljnog razdvajanja krupnijih i sitnijih zrna. Raspodjela veličina zrna u ukupnom sastavu naziva se granulometrijski sastav agregata ili granulometrijski sastav pijeska ili neke frakcije. Uobičajene nazivne frakcije u proizvodnji agregata su:

- 0 - 4 mm,
- 4 – 8 mm,
- 8 – 16 mm,
- 16 – 32 mm,
- 32 – 63 mm,
- 63 – 125 mm. [3]

#### **1.2.4 Osnovni uvjeti kvalitete agregata**

Osnovna podjela agregata koji se koristi za izradu betona:

- sitni agregat - zrna koja prolaze kroz sita otvora 4 mm
- krupni agregat - zrna koja ne prolaze kroz sita otvora 4 mm

Komponente koje su štetne s aspekta fizičko – mehaničkih svojstava betona definiraju se mineraloško – petrografskim ispitivanjima:

- izmijenjena (slaba) zrna, glinoviti pješčari, lapori i laporovski karbonati, argilošisti, mikašisti, filiti, škriljci, gips, glina i glinci, serpentin, liskun, ugalj i drugi,
- uzročnici alkalno – silikatne reakcije (opal – amorfni, tridimit, kristobalit, rožnjaci, vulkanska stakla, hidroliskuni i drugi),
- uzročnici korozije armature (minerali koji sadrže halogene elemente: halit, silvin i minerali koji sadrže sumpor: pirit, markiz, pirotin, anhidrit)
- uzročnici sprječavanja hidratacije (saharit, masti). [5]

#### **1.2.5 Fizikalna svojstva agregata**

Prirodni agregat za beton treba biti čist, tvrd, žilav, čvrst, postojan i dobrog granulometrijskog sastava.

Gustoća zrna agregata je masa osušenog zrna agregata u volumenu zrna agregata bez pora. Masa agregata određuje se vaganjem uzorka agregata osušenog na 100 do 110 °C.

Prividna gustoća zrna agregata je masa osušenog zrna agregata u volumenu zrna agregata sa zatvorenim porama, odnosno volumenu vodom zasićenih zrna agregata.

Volumna masa zasićenog površinski suhog zrna agregata je masa zrna agregata u ukupnom volumenu zrna agregata zajedno s porama. To je volumna masa s kojom se proračunava sastav betona, jer voda u porama agregata ne sudjeluje u kemijskoj reakciji hidratacije cementa u betonu i u proračunu betonske mješavine promatra se kao dio agregata.

Volumna masa zrna agregata je masa osušenog zrna agregata u ukupnom volumenu zrna agregata zajedno s porama. To je svojstvo koje se najizravnije određuje. [3]

### **1.2.6 Poroznost i apsorpcija vode**

Poroznost agregata, propusnost za vodu i apsorpcija vode su svojstva koja utječu na prionljivost cementnog kamena i agregata u betonu, otpornost betona na djelovanje mraza, kemijsku i erozijsku otpornost betona. Također utječu i na gustoću, odnosno zapreminsku masu agregata i važno je da ih se obuhvati proračunom pri projektiranju sastava betona.

Pore u agregatu vrlo su različite po veličini, ali i one najmanje su veće od gel pora u cementnom kamenu. Iako je ukupna poroznost cementnog kamena znatno veća od poroznosti agregata, ipak je propusnost agregata veća jer su pore u agregatu znatno veće.

Obzirom na sadržanu vlagu, razlikuju se četiri stanja agregata:

- potpuno suh agregat – agregat sušen na temperaturi od 100 do 110 °C do konstantne težine
- prirodno suh agregat – agregat koji sadrži manju količinu vlage u agregatu, ovisno o vlažnosti okoline, ali je suhe površine
- zasićen, površinski suhi agregat – agregat koji nema na površini slobodne vlage, ali su sve otvorene pore ispunjene vodom
- vlažan agregat – agregat kojem su pore ispunjene vodom, a na površini ima apsorbirane i slobodne vode.

Četvrti i drugi slučaj su najčešći u proizvodnji. [3]

### 1.2.7 Granulometrijski sastav agregata

Izbor granulometrijskog sastava najznačajnije je pitanje tehnologije betona. Potrebno je:

- postići povoljnu ugradljivost i obradljivost svježe betonske mješavine
- postići odgovarajuće fizičko - mehaničke osobine očvrslog betona

Kod eksperimentalnog definiranja sastava agregata treba težiti:

- većem postotku najkrupnije frakcije, pri čemu je potrebno voditi računa o ugradljivosti i obradljivosti,
  - granulometrijski sastav sitnog agregata u referentnom području,
  - sitne čestice (prašinate i glinovite) veličine ispod 0,09 mm, definirane su u tablici.
- Veća količina može smanjiti čvrstoću i otpornost na djelovanje mraza, povećati upijanje vode, skupljanje i tečenje.

Osnovna frakcija ili međufrakcija	Sitan agregat		Krupan agregat
	0/4   0/1   0/2	1/4   2/4	Sve frakcije i međufrakcije
Maksimalni sadržaj sitnih čestica (%)	5 ili 10 <sup>*)</sup>	3	1

<sup>\*)</sup> Vrijednost 5% odnosi se na prirodni, a vrijednost 10% na drobljeni agregat

*Slika 1.2 Granulometrijski sastav agregata [5]*

### 1.2.8 Voda

Kvaliteta vode vrlo je važna za beton, i to kako vode koja se upotrebljava za spravljanje betona, tako i vode za njegovanje betona, i kasnije, vode koja dolazi u kontakt s očvrslim betonom. Voda koja dolazi u dodir s očvrslim betonom i često se izmjenjuje kao posljedica promjena vodostaja ili protjecanja, može sadržavati znatno manje količine tvari štetnih za beton. Naime, te se tvari stalno obnavljaju te znače uvijek novu agresiju za beton.

Najčešće se smatra da je voda za piće dobra i za izradu betona. Voda koja nije pitka može biti prikladna za izradu betona. Najčešće je dovoljno da je pH između 6 i 8 te da nije slana (ne sadrži kloride). Manja kiselost vode nema veći utjecaj na svojstva betona, jer te kiseline neutraliziraju alkalni oksidi i velika količina vapna iz cementa, ali veći sadržaj humusnih kiselina može usporiti proces vezanja i smanjiti čvrstoću betona. Takve vode treba prije uporabe detaljno ispitati i usporediti s kriterijima za vodu za izradu betona.

Često se raspravlja o upotrebi morske vode za izradu betona. Ona sadrži oko 3,5 % soli, od čega je najviše NaCl, zatim magnezij klorid i magnezij sulfat. Takve soli ubrzavaju vezanje cementa i rani prirast čvrstoća, a rezultiraju nešto manjim konačnim čvrstoćama. Osim toga, betoni pripremljeni s vodom koja sadrži kloride su higroskopni i stalno vlažni, a na površini se izlužuju soli. Tamo gdje je važan izgled betona ne može se, prema tome, za izradu betona upotrebljavati morska voda.

U slučaju armiranog betona, ne smije se upotrebljavati morska voda za izradu betona, jer to povećava rizik od korozije armature u betonu. [3]

### **1.2.9 Voda za njegovanje betona**

Voda za izradu betona najčešće je prikladna i za njegovanje betona. Međutim, ako sadrži organske nečistoće ili željezne okside te ako se u većim količinama polagano slijeva preko površine betona, to može ostaviti ružne tragove. Previše intenzivno polijevanje vodom, naročito ako sadrži slobodni CO<sub>2</sub> ili je vrlo mekana voda, može izazvati površinska oštećenja mladog betona.

Njegovanje armiranog betona morskom vodom je nedopustivo radi korozije armature. [3]

### **1.3 Općenito o poroznom betonu**

Porozni beton sadrži malo ili gotovo nimalo sitnih čestica, a sastoji se uglavnom od krupnog agregata i cementne paste. Rezultat takvog sastava je veća količina pora u rasponu od 15-35% volumena. [6]

Porozni betonski kolnik ima jedinstveno i učinkovito značenje u zadovoljenju rastućih zahtjeva zaštite okoliša. Hvatanjem kišnice i dopuštajući da ulazi u podzemlje, porozni beton ima ulogu u punjenju podzemnih voda, smanjenju oborinskih otjecanja i ispunjavanju uvjeta američke Agencije za zaštitu okoliša (EPA). [7]

Karakteristike poroznog betona omogućuju mu da funkcionira kao iznimno logična i cjenovno kompetitivna alternativa tradicionalnim sustavima drenaže koje podrazumijevaju zadržavanje, spremnike za zadržavanje i s njima povezane strukture poput cijevi. Protok vode na terenu, kao rezultat snijega ili kiša, poznat je kao "površinsko otjecanje". Poznato je da iznos tog otjecanja raste kao rezultat razvoja (npr. zgrada) pojedinog područja. Razlog za to su nepropusne površine, kao što su krovovi, prolazi, nogostupi, ceste, autoceste, parkirališta, staze, itd., koje su stvorene kao posljedica razvoja i ne dopuštaju



otjecanje, prodiranje ili infiltraciju vode u tlo. Porozni beton, ispravnog sastava i konstrukcije osigurava da se sve padaline apsorbiraju i/ili pohrane te na taj način služi kao suhi spremnik. Time se potrebne površine za tradicionalno zadržavanje i pohranjivanje vode eliminiraju ili umanjuju. To omogućava da se više zemlje iskoristi u svrhe novih građevina ili odgovarajućih prostora. Poznat je niz tradicionalnih pristupa u građevini i tijekom godina primjenjivali su se za drenažu otjecanja s razvijenih područja. S manjim varijacijama gotovo svih tih klasičnih metoda podrazumijevaju se padine na tim površinama otjecanja, da se otjecanje može prenijeti putem drenažnih cijevi, ulegnuća, rovova, kanala ili sličnih sredstava za velike odvođe vode, kao što su jezera, rijeke, more ili zadržavanja u lokvama ili bazenima. Sve ove tradicionalne drenažne tehnike povezane s konvencionalnim betonom i asfaltom, pate od istih inherentnih nedostataka:

- zemljane konstrukcije su značajnih veličina kako bi se proizvele potrebne padine,
- dodatni građevni zahtjevi u pogledu dodatnih struktura kao što su cijevi, ulegnuća, rovovi i spremnici,
- akumulacije služe trajnom ili privremenom zadržavanju površinskog otjecanja, odnosno smanjuju površine raspoložive za razvoj (tj. prostor za zgrade, parkirališta, nogostupe, itd.),
- kontinuirano održavanje cijevi, jama, bazena, itd.,
- moguća erozija uslijed otjecanja preko različitih površina prije postizanja svojih destinacija,
- Ako je osnova izrađena od asfalta tada se on tijekom vremena otapa. Različite površine se zagađuju tijekom vremena prometom, uljem te mazivom koji promet stvara. Voda koja otječe neizbježno prelazi preko tih nepropusnih površina do svog odredišta i na taj način prenosi sva površinska zagađenja koja na kraju uzrokuju probleme budući da završe u nekoj drugoj nakupini vode. Otjecanje vode može u sebi sadržavati gnojiva i pesticide. Poznato je da voda koja otječe može biti toksičnija od voda u kanalizaciji,
- Asfaltni i konvencionalni betonski kolnici upijaju sunčeve zrake, zagrijavaju se te na taj način povećavaju temperaturu te odvodne vode tijekom njenog toka preko tih površina. Ta topla voda može uzrokovati probleme ili uništiti podzemni život, biljke i neke korisne bakterije,
- Budući da nijedna od klasičnih metoda drenaže ne podrazumijeva bilo kakvo prirodno pročišćavanje ili filtriranje vode koja otječe na njenom putu do odredišta,

postoji potreba za tretiranjem ili čišćenjem na odredištu što dovodi do zahtijeva za dodatne konstrukcije i ulaganja,

- Ni jedan od klasičnih metoda drenaže nije "zelen" u smislu da pridonosi zagađenju jer prenose zagađenja tijekom toka preko tih temeljnih površina i zbog toga su potrebne dodatne investicije i energija za rješavanje problema koji iz toga proizlaze.

Usporedno sa rastućom potrebom za ekološkom osviještenosti i održivom gradnjom, porozni beton se nameće kao ekonomski i ekološki prihvatljiva alternativa za drenažu kišnice i snijega. [8]



*Slika 1.3 Porozni beton [9]*

Primjena propusnog betona je vrlo široka. Najčešće se upotrebljava za izradu:

- pločnika i pješačkih staza,
- kolničkih prilaza,
- parkirališta,
- trgova,
- staza i puteva u prirodnom okruženju,
- retencijskih polja,
- akustičnih panela (bukobrani),
- područja uz plaže i bazene,
- dekorativnih betona. [10]



*Slika 1.4 Odnos brzine sušenja između asfaltnog kolnika i kolnika od poroznog asfalt - betona [11]*

#### **1.4 Povijesni razvoj poroznoga betona**

Prva upotreba poroznoga betona bila je u Ujedinjenom Kraljevstvu 1852. godine za izgradnju dviju stambenih kuća i morske brane. Prvotni razlog njegove upotrebe bila je ekonomska isplativost, zahvaljujući ograničenoj upotrebi cementa. Tek nakon 1923. godine započinje upotreba površina od poroznoga betona kao održiv način gradnje i ovaj put njegova upotreba bila je ograničena na područje Škotske, Liverpoola, Londona i Manchester. [12]

Koristi se u SAD-u, a nešto manje u Europi. Od 1939. do 1945. godine, razaranja u Drugom svjetskom ratu ostavila su Europu u ogromnim potrebama za novom infrastrukturom. To je potaknulo razvoj novih i prethodno neiskorištenih metoda i materijala za građenje. Među tim materijalima je bio i porozni beton. Njemačka se koristila proizvodnjom poroznog betona zbog nestašice materijala i zbrinjavanja velike količine građevinskog otpada (cigle, šute). [13]

#### **1.5 Porozni betonski kolnici**

Pravilno oblikovani porozni betonski kolnik može smanjiti nepovoljan utjecaj na okoliš koji se često povezuje s razvitkom nekog područja. Porozni betonski kolnik može se koristiti za poboljšanje utjecaja na okoliš zamjenom postojećih konvencionalnih pločnika. Mogućnost istovremenog održavanja kvalitete vode, smanjenja poplava, povećanja baznog toka i očuvanja vrijednih parkirališnih prostora su sposobnosti koje se ne mogu lako postići alternativnim ublažavanjem poplava ili drugim kvalitetama vode.

Potrebe društva često su ograničene raznim zakonima, uključujući ograničenja korištenja zemljišta, ograničenja prostornog uređenja i naknade te se pojavljuje sve veća zabrinutost

zbog površinskog otjecanja. Te potrebe mogu se razlikovati prema zajednici, lokaciji i primjeni, a uključuju i kontrolu poplava te kontrolu kvalitete vode.

Premda se posljednjih desetljeća porozni beton koristi u nekim područjima, sve veći interes za održivom ili zelenom gradnjom, kao i priznanje Američke agencije za zaštitu okoliša (EPA) poroznim betonskim kolnicima kao najboljim rješenjima za upravljanje oborinskim vodama, dodatno je povećao interes za uporabom poroznog betona diljem Sjeverne Amerike.

Porozni betonski kolnici mogu biti važan dio održivog prostora, istodobno osiguravajući pristup i parkirno mjesto.

Za razliku od mnogih drugih načina upravljanja oborinskim vodama, porozni betonski kolnici mogu na učinkovit i ekonomičan način utjecati na postojeće izgrađene dijelove kako bi im poboljšali hidrološke karakteristike.

Porozni betonski kolnici mogu:

1. Uхватiti 'prvu vodu' površinskog otjecanja i na taj način smanjiti zagađenje, uključujući smeće i druge otpatke površinskog otjecanja,
2. Kratkotrajno pohranjivati oborinske vode i time:
  - Smanjivati volumen površinskog otjecanja,
  - Osiguravati dodatnu infiltraciju, čime se pune podzemne vode i povećava bazni protok,
  - Time se također smanjuje brzina vode u prirodnim i umjetnim kanalima za odvodnju i smanjuje se površinsko otjecanje, što može smanjiti opterećenje sedimenata koja se prenose u prihvatne vode, jer se smanjuju i erozija kanala i količina materijala koji se prenosi u te kanale.

Porozni betonski kolnici također pogoduju okolišu i na druge načine. Površinska temperatura poroznog betona je niža od temperature asfaltnog kolnika čime se smanjuje učinak 'vruće zone' karakteristične za izgrađena područja. Početno otjecanje iz konvencionalnih kolnika može biti mnogo toplije od temperature prihvatnih voda čime se podiže ukupna temperatura prijamne vode i može se izazvati ekološka nepogoda. Budući da površinsko otjecanje protječe kroz porozni betonski kolnik, a ne ide izravno u prijamnu vodu, može se značajno smanjiti potencijalno povećanje temperature prijamne vode.

Porozni betonski kolnici ne samo da pozitivno utječu na kvalitetu i kvantitetu vode, nego mogu pružiti i druge pogodnosti. Porozni beton može smanjiti formiranje mraza, čime se smanjuje opasnost od klizanja, jer se otopljeni led odvodi u pločnik umjesto da ostaje na površini.

Značajke materijala od kojeg je napravljen porozni beton znatno utječu na konačni dizajn. Poroznost poroznog betona utječe i na hidrološki značajna svojstva (poput propusnosti i kapaciteta skladištenja), ali i na mehanička svojstva (snagu i krutost). Porozni beton koji se koristi u poroznim betonskim kolnicima mora biti koncipiran na način da podnosi prometno opterećenje te da na ispravan način upravlja oborinskim vodama. Projektant mora osigurati odgovarajuća svojstva materijala, odgovarajuću debljinu pločnika i ostale potrebne karakteristike kao što su filtarski materijal ili geotekstilna armatura, kako bi istovremeno ispunjavali hidrološke zahtjeve i podnosili očekivana prometna opterećenja. [14]



*Slika 1.5 Porozni beton može smanjiti površinsko otjecanje i puniti zalihe podzemne vode [14]*

## 2 DODACI

### 2.1 Ljuske riže

Kao mineralni dodaci betonu, mogu se upotrebljavati i ljuske riže, kojih se proizvede približno 90 milijuna tona godišnje. Približno 20 kg rižinih ljuskica preostane nakon obrade 100 kg riže.

Sadržaj  $\text{SiO}_2$  ovisi o temperaturi u procesu spaljivanja. Više temperature pri spaljivanju rezultiraju većim sadržajem  $\text{SiO}_2$ . Spaljivanjem rižinih ljuskica na temperaturama između 600 i 700 °C nastaje mineralni dodatak s 90 – 95%  $\text{SiO}_2$ , 1 – 3%  $\text{K}_2\text{O}$  i manje od 5% nespaljenog ugljena. Zamjenom jednog dijela cementa s mineralnim dodatkom rižinih ljuskica u optimalnom omjeru, betonu se:

- poboljšava obradivost,
- smanjuje toplina hidratacije,
- smanjuje sklonost termičkim pukotinama,
- smanjuje skupljanje,
- povećava čvrstoća,
- poboljšava nepropusnost,
- poboljšava otpornost na agresivna djelovanja okoliša,
- poboljšavaju trajnosna svojstva,
- Prema istraživanjima, mehanička i trajnosna svojstva betona sa zamjenom dijela cementa mineralnim vezivom na osnovi rižinih ljuskica su poboljšana u usporedbi s betonom u kojem je cement zamijenjen mineralnim vezivom na bazi silicijske prašine. Rezultat je to blokiranja kapilarnih pora u betonu i progušćivanja prijelazne zone u betonu. [15]



*Slika 2.1 Ljuske riže [16]*

## **2.2 Silicijska prašina**

Silicijska prašina je sporedni proizvod koji nastaje pri proizvodnji silicijskih i ferosilicijskih legura u elektrolučnim pećima. To je vrlo fina prašina raznih nijansi sive boje, koja se u literaturi javlja pod različitim nazivima: mikrosilika, condensed silica fume, silica fume... Mikrosilika je zapravo komercijalni naziv za prašinu  $\text{SiO}_2$ .

Silicijska prašina sastoji se od nekristaliziranih sferičnih amorfnih čestica silicijevog dioksida. Nastaje u procesu redukcije kvarca u metalni silicij pri temperaturi od oko  $2000^\circ\text{C}$ . U plinovima koji nastaju u procesu topljenja kvarcne rudače u elektroredukcijskoj peći, silicij reagira s kisikom formirajući nestabilni  $\text{SiO}_2$  koji na temperaturi od  $1100^\circ\text{C}$  s kisikom iz zraka daje vrlo fini dispergirani i amorfni  $\text{SiO}_2$ . Silicijska prašina se izdvaja u procesu predsepariranja i filtriranja prašine iz proizvedenih otpadnih dimnih plinova na tehničkom sustavu za otprašivanje.

### **2.2.1 Proizvodnja silicijskih i ferosilicijskih legura**

Sirovinski materijali (kvarc, drvena sječka, kameni ugljen lignit, metalurški koks, željezna strugotina) međusobno se miješaju u definiranim stehiometrijskim odnosima i dodaju u elektropeč u kojoj se zagrijevaju približno na temperaturu  $2000^\circ\text{C}$ . Kada se smjesa sirovina ubaci u elektro redukcijsku peć, ona polako propada na niže pri čemu raste temperatura svih sastojaka smjese. Kada se sirovine zagriju na potrebnu temperaturu, odvijaju se

kemijske reakcije redukcije kvarca pomoću ugljika. Dobivena legura se skuplja na dnu elektropeći i ispušta u transportne lonce.

Redukcijski prostor u elektroredukcijskoj peći može se uvjetno podijeliti na 3 područja. Prvo područje je područje visokih temperatura i nalazi se u neposrednoj blizini električnog luka. Ovo područje se još naziva i unutrašnje reakcijsko područje elektropeći s temperaturom od 2000 °C. U ovom području su tvari obično u plinovitom stanju zbog visokih temperatura i to su silicijev monoksid ( $\text{SiO}$ ) i  $\text{CO}$ . Drugo područje je područje nižih temperatura i označava se kao vanjsko reakcijsko područje gdje temperature obično ne prelaze 1900 °C. U ovom području nalazi se kvarc i ugljični materijali, ali i određene količine silicijevog karbida ( $\text{SiC}$ ). Treće područje čini otopljeni ferosilicij ili druga legura na dnu kadne peći. U ovom području se mogu naći i manje količine  $\text{SiC}$  koji nije do kraja reagirao sa  $\text{SiO}$  do elementarnog silicija.

U praktičnim uvjetima vođenja procesa proizvodnje ferosilicija ili drugih legura, najbitnije je odrediti optimalnu količinu ugljika, odnosno reducenata (ugljičnih materijala) koji se uvode u peć. Režim rada s optimalnom količinom reducenata ima za posljedicu stvaranje viška silicijevog monoksida ( $\text{SiO}$ ), jer se  $\text{SiO}_2$  ne reducira u potpunosti. U ovakvim uvjetima rada značajno se povećava potrošnja električne energije, a iz peći izlazi bijeli gusti dim koji predstavlja plinoviti  $\text{SiO}$ .

Pojedinačne čestice silicijske prašine vrlo su male, 50 – 100 puta manje nego čestice cementa i imaju veličinu u prosjeku 0,1 – 0,5 mikrometara. Zbog finoće čestica, velike specifične ploštine i visokog sadržaja  $\text{SiO}_2$ , silicijska prašina je vrlo reaktivan pucolan kada se upotrebljava u betonu. Silicijska prašina ima nasipnu gustoću približno 150 – 250  $\text{kg/m}^3$ . Specifična gustoća mikrosilike iznosi približno 2200  $\text{kg/m}^3$ .

Silicijska prašina utječe na svojstva betona s dva mehanizma: pucolanskim reakcijama i učinkom sitnih čestica. Pucolanskim reakcijama povećava se količina  $\text{C} - \text{S} - \text{H}$  gela, a sitne čestice doprinose poboljšanju obradivosti i povećanju kohezivnosti te zapunjavaju unutrašnju strukturu, jer su znatno sitnije od čestica cementa. Silicijska prašina utječe na povećanje čvrstoće i smanjenje propusnosti betona. Obzirom na veliku specifičnu ploštinu, silicijska prašina utječe na povećanje potrebe za vodom.

Kemijski zahtjevi za silicijsku prašinu su:

- sadržaj silicijevog dioksida ( $\text{SiO}_2$ ),



- sadržaj elementarnog silicija,
- sadržaj slobodnog kalcijevog oksida, slobodni CaO,
- sadržaj sulfata, izražen kao SO<sub>3</sub>,
- ukupni sadržaj alkalija,
- sadržaj klorida (izražen kao Cl),
- gubitak žarenjem (uz vrijeme žarenja 1 h).

Silicijska prašina se može dodati u beton u količini do 15%, no uobičajeno doziranje je između 7 – 10% na količinu cementa. Doziranje silicijske prašine treba optimizirati, jer SiO<sub>2</sub> ulazi u vezu s kalcijevim hidroksidom Ca(OH)<sub>2</sub> što može utjecati na znatno smanjenje pH. Kako je upravo kalcijev hidroksid bitan za bazičnost betona, to njegovo prekomjerno vezivanje sa silicijskom prašinom može imati negativan efekt.

Silicijska prašina povećava potrebu za vodom u betonu te se preporuča rabiti ju zajedno s kemijskim dodatkom plastifikatorom ili superplastifikatorom. Ukoliko se silicijska prašina upotrebljava zajedno s kemijskim dodatkom aerantom, količinu aeranta treba povećati za dobivanje zahtijevane količine zračnih pora u odnosu na beton bez silicijske prašine.

Beton s dodatkom silicijske prašine ima povećanu koheziju i stoga nema sklonosti segregaciji i izdvajanju vode. Primjena silicijske prašine u betonu poboljšava svojstva očvrstnalog betona, jer povećava čvrstoću.

Na istim betonima mjerene su i volumenske deformacije skupljanja i to autogeno skupljanje i skupljanje od sušenja. Ukupna deformacija skupljanja bitno se ne razlikuje, no autogeno skupljanje je kod betona sa silicijskom prašinom nešto povećano, dok je skupljanje od sušenja smanjeno.

Zbog velike specifične ploštine čestica i fizičkog zapunjavanja pora gela i kapilarnih pora u strukturi betona, silicijska prašina znatno smanjuje propusnost betona za kloride u morskom okolišu i za plinove. U laganom betonu ciljane volumenske mase od 1850 kg/m<sup>3</sup> i velikih čvrstoća, pozitivan utjecaj silicijske prašine pokazao se do dodavanja u količini od 20%.

Zbog svih pozitivnih svojstava betona s dodatkom silicijske prašine, ona je upotrebljavana i pri betoniranju za sada najviše građevine na svijetu, Burj Khalifa u Dubaiju. [15]

### 2.3 Leteći pepeo

Leteći pepeo je fini prah koji se uglavnom sastoji od čestica sferičnog oblika, dobiven izgaranjem ugljene prašine, uz eventualno sporedne materijale za izgaranje.

Za vrijeme izgaranja ugljena u termoelektranama, ugljen u visokoj peći prolazi kroz područja s visokom temperaturom. Pri tome izgaraju lebdeća tvar i ugljik, dok se većina mineralnih nečistoća kao što su glina, kvarc i feldspati tale na visokoj temperaturi. Otopljena tvar se brzo prenosi u područja s manjom temperaturom gdje očvršćava u sferične čestice stakla. Neki od aglomerata minerala padaju na dno, dok većina finih čestica lebdi sa strujom dimnih plinova i naziva se leteći pepeo. Pepeo se potom uklanja iz plina centrifugalnim odvajanjem, elektrostatskim taloženjem (precipitacijom) i filtriranjem.

Prema mineraloškom sastavu i svojstvima, leteći pepeo se može podijeliti u dvije vrste obzirom na sadržaj kalcija. Prva vrsta sadržava manje od 10% analitičkog CaO i uglavnom nastaje izgaranjem antracita i bitumenskog (crnog ili mrkog) ugljena. Druga vrsta obično sadrži od 15 do 40% CaO i uglavnom nastaje izgaranjem lignita i subbitumenskog ugljena.

Leteći pepeo s malim sadržajem kalcija sastoji se uglavnom od alumosilikatnog stakla zbog velikog udjela silicija i aluminijskog. U peći, ako se veliki sferični dijelovi otopljenog stakla ne ohlade brzo i jednoliko, tada silimanit i mulit mogu kristalizirati kao tanke iglice u unutrašnjosti sferičnog stakla. Ovaj proces djelomične kristalizacije stakla (devitifikacije) letećeg pepela s malim sadržajem vapna, razlog je prisutnosti kristalnih alumosilikatnih minerala. Također, ovisno o finoći na koju je usitnjen ugljen prije izgaranja, u svim letećim pepelima će vjerojatno biti prisutni ostaci  $\alpha$  kvarca. Analizama je dobiveno da su glavni kristalni minerali u letećem pepelu s malim sadržajem kalcija kvarc, mulit te hematit i magnetit. Obzirom da ti minerali nisu reaktivni na običnim temperaturama, njihova prisutnost u velikim količinama utjecat će na smanjenje pucolanske aktivnosti letećeg pepela.

Leteći pepeli s velikim udjelom kalcija općenito su puno reaktivniji, jer sadrže većinu kalcija u obliku reaktivnih kristalnih sastojaka. Uz to, glavni sastojak (tj. nekristalizirana faza) sadrži dovoljno kalcijevih iona da pobudi reaktivnost alumosilikatnog stakla. Većina letećih pepela iz modernih peći, neovisno o tome radi li se o malom ili velikom udjelu kalcija, sadrže približno 60 do 85% stakla, 10 do 30% kristalne komponente i do 5% neizgorenog ugljika. Ugljik je obično prisutan u obliku ćelijastih čestica većih od 45  $\mu\text{m}$ .

Više od 5% ugljika u letećem pepelu nepoželjno je za primjenu u betonu, jer ćelijaste čestice povećavaju potrebu za vodom pri danoj konzistenciji.

Većina čestica u letećem pepelu pojavljuje se u obliku čvrstih kuglica stakla. Ponekad mogu biti prisutne i šuplje kuglice te kuglice koje su nastale od mnoštva malih kuglica. Općenito, pod elektronskim mikroskopom, sferični dijelovi letećeg pepela s malim udjelom kalcija izgledaju čišći od onih s velikim udjelom kalcija. To se objašnjava time da se u letećim pepelima s velikim udjelom kalcija javljaju veće količine alkalija i sulfata pa na površini sferičnih čestica nastaju naslage alkalijskih sulfata. Čestice letećeg pepela mogu biti promjera manjeg od  $1\text{ }\mu\text{m}$ , s 50% masenog sadržaja manjeg od  $20\text{ }\mu\text{m}$ . Granulometrijski sastav letećeg pepela, njegova morfologija i svojstva površine, znatno utječu na potrebu za vodom i obradljivost svježeg betona te brzinu prirasta čvrstoće.

Leteći pepeo poboljšava svojstva betona na dva načina:

- fizičkim efektom povezanim s povišenjem udjela finih čestica – čestice letećih pepela manje su nego čestice cementa ( $1\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ ) i
- pucolanskim i/ili hidrauličkim reakcijama.

Leteći pepeo smanjuje potrebu za vodom u betonu i izdvajanje vode, poboljšava obradljivost, smanjuje propusnost betona i usporava oslobađanje topline hidratacije pa je povoljno upotrebljavati ovaj mineralni dodatak kod masivnih betona.

Kemijski zahtjevi za leteći pepeo su:

- gubitak žarenjem (uz vrijeme žarenja 1h),
- sadržaj klorida (izražen kao  $\text{Cl}^-$ ),
- sadržaj sumpornog anhidrida,  $\text{SO}_3$ ,
- sadržaj slobodnog kalcijevog oksida,
- sadržaj reaktivnog kalcijevog oksida,
- sadržaj reaktivnog silicijevog dioksida ( $\text{SiO}_2$ ),
- ukupni sadržaj  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,
- ukupni sadržaj alkalija,
- sadržaj magnezijevog oksida,  $\text{MgO}$ ,
- sadržaj topljivog fosfata,  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Prednosti korištenja letećeg pepela u betonu su mala cijena i mala potrošnja energije, jer leteći pepeo nastaje kao sporedni proizvod, a nedostaci mogu biti smanjena početna čvrstoća i produljenje vremena vezivanja betona. Rješenje za to može biti alkalno aktiviranje, npr. s 1% NaOH ili kombinacija s kemijskim dodacima, superplastifikatorima.

Unatoč prednostima letećeg pepela, još uvijek je nedovoljna njegova uporaba u betonu velikim dijelom zbog nedovoljnih istraživanja, a dijelom zbog manje početne pa i 28-dnevne čvrstoće u odnosu na beton bez letećeg pepela. Čvrstoće betona s dodatkom letećeg pepela se sa starošću povećavaju i veće su nego čvrstoće betona bez dodatka letećeg pepela. Skupljanje betona sličnih 28 dnevnih tlačnih čvrstoća, a različitih vodovezivnih omjera rezultira smanjenjem skupljanja betona s dodatkom letećeg pepela. Betoni istog vodovezivnog omjera 0,29, a različitih količina letećeg pepela, rezultiraju vrlo sličnim deformacijama skupljanja kao i kontrolni beton bez dodatka letećeg pepela.

Smanjenje vodovezivnog omjera uporabom letećeg pepela u kombinaciji s kemijskim dodacima rezultira smanjenom povezanošću pora u strukturi betona i s tim u vezi i smanjenom propusnošću. Smanjena propusnost betona povećava trajnost betona i otpornost betona konstrukcije na različite agresivne utjecaje iz okoliša, kao npr. na smanjenje prodora klorida u morskom okolišu i smanjenje brzine korozije s povećanjem udjela letećeg pepela u betonu. To je i razlog što se betoni s dodatkom letećeg pepela primjenjuju u betonima elemenata mostova kao npr. u ploči i stupovima mosta Sunshine Skyway u zaljevu Tampa.

Toplinska svojstva betona s letećim pepelom poboljšavaju se s povećanjem udjela letećeg pepela u betonu. Zahtjevi održivog razvoja doprinose sve većoj primjeni letećeg pepela u betonu u svijetu. Razlog tehničke regulative kreće se u pravcu propisivanja svojstava u uporabi, a za projektirana mehanička svojstva betona s letećim pepelom u raspravama je prijedlog za prihvatanje 56 ili 90- dnevnih čvrstoća. [15]

### 3 DOSADAŠNJA ISPITIVANJA POROZNOG BETONA UZ DODATAK ADITIVA

#### 3.1 Istraživanja o djelomičnoj zamjeni cementa u poroznom betonu (Manoj Nallanathel, B. Ramesh, Srikanth S)

##### 3.1.1 Sažetak

Porozni beton je beton koji sadrži malo ili nimalo sitnog agregata, sastoji se od krupnog agregata i cementne paste. Porozni cement se koristi u 'zelenoj gradnji'. Pomaže punjenju zaliha podzemne vode ispod kolnika. U ovom istraživanju promatrana su fizička svojstva čvrstoće poroznog betona tako da je cement djelomično zamijenjen letećim pepelom, drvenim prahom, rižinom ljuskom...

##### 3.1.2 Uvod

Porozni beton se najprije koristio 1800-ih godina u Europi kod izrade kolnika i nosivih zidova, najprije zbog cijene budući da je u njemu količina cementa smanjena. Potrebno je napomenuti da je korišten 1920-ih za izgradnju dvije kuće u Europi. Njegovo korištenje u Europi je poraslo nakon Drugog svjetskog rata zbog nedostatka cementa. U Americi je to bilo tek 1970-ih, a u Aziji 2000-ih godina. Porozni cement može biti bez slijevanja. Uslijed nedostatka sitnog agregata, porozni beton spaja pore veličine od 2 do 8 mm, a sadržaj šupljina varira od 15-25% s tlačnom čvrstoćom od 2,8 MPa do 28 MPa. Brzina infiltracije poroznog betonskog kolnika mijenja se s veličinom i gustoćom mješavine, no obično iznosi od 81 do 730 L/min/m<sup>2</sup>.



*Slika 3.1 Usporedba poroznog i običnog betona [17]*



*Slika 3.2 Porozni betonski blok [18]*

**Pregled literature:** Ranije, istraživači su proveli nekoliko eksperimenata kako bi odredili svojstva betona, primjenu i korištenje otpadnog materijala i materijala koji će zamijeniti cement u poroznom betonu. Otkriveno je da poroznost betona neznatno varira ovisno o granulometrijskom sastavu i omjeru agregata i da tlačna čvrstoća raste s vremenom. Još jedan istraživač (Makarand, 2014) je mjerio tlačnu i savojnu čvrstoću betona kada se cement zamijeni s rižinim ljuskama. Istraživač (Rafat Siddique, 2012) je u svojim testovima određivao gustoću, tlačnu čvrstoću i vodopropusnost kada se cement zamijeni s letećim pepelom. Rezultati i podaci istraživanja su prikazani u tablicama i grafovima.

**Izrada mješavine:** Za izradu poroznog betona koriste se isti materijali kao i za izradu običnog betona, samo što se sitni agregat uopće ne koristi ili se koristi u jako maloj količini. Veličina krupnog agregata koji se koristi je konstantna (obično 3/8 inča) da bi se smanjila površinska hrapavost i zbog boljeg estetskog izgleda. Veličina može varirati između ¼ i ½ inča. Vodocementni omjer treba biti između 0.27 i 0.34. U poroznom betonu se mogu koristiti čak i obični portland cement te miješani cement. Kao dio poroznog cementa mogu se koristiti dodaci s manjim sadržajem vode i usporivači. Sastavbetonske mješavine dan je u tablici ispod.

*Tablica 1.1 Tipični sastav mješavine poroznog betona [19]*

<b>Materijali</b>	<b>Količina (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Cement</b>	<b>270 do 415</b>
<b>Agregat</b>	<b>1190 do 1480</b>
<b>Vodocementni faktor</b>	<b>0.27 do 0.34</b>
<b>Odnos sitnog i krupnog agregata</b>	<b>0 do 1:1</b>

**Opći problemi s kojima se porozni beton susreće u usporedbi sa standardnim:**

- dugo vrijeme miješanja,
- loša obradivost, vrlo suha mješavina i teška za ugrađivanje,
- količina vode korištena u mješavini je jednako važna kao i kod standardnog betona,
- ako se koristi previše vode, očekivano je odvajanje koje je obično veće nego kod standardnog betona,
- ako se koristi premalo vode, teško je miješati i stvaraju se grudice u mješavini.

**Zamjena cementa s letećim pepelom:** Leteći pepeo se sastoji od finih, praškastih čestica kuglastog oblika, koje imaju ista svojstva kao i mulj. Uobičajena poroznost poroznog betona je oko 0,33, a zabilježena su određena odstupanja između različitih mješavina. Može se primijetiti da na poroznost poroznog betona neznatno utječe granulometrijski sastav agregata, a zamjena određenog postotka cementa s letećim pepelom nema značajnog utjecaja. Učinak granulometrijskog sastava agregata i promjena poroznosti zbijanjem mogu se povezati s veličinom pora u poroznom betonu. Tlačna čvrstoća poroznog betona obično je manja od 10 MPa zbog visoke poroznosti.

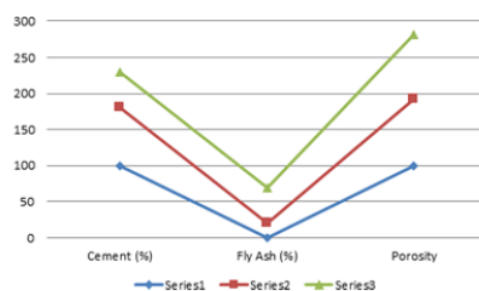
**Poroznost poroznog betona:** Prosječna poroznost poroznog betona je 0,33, a zabilježena su određena odstupanja između različitih mješavina. Na poroznost poroznog betona malo utječe granulometrijski sastav i omjer agregata.

**Tlačna čvrstoća poroznog betona:** Tlačna čvrstoća poroznog betona obično je manja od 10 MPa. Ipak, ona se povećava s vremenom. Mješavina u kojoj se cement zamijeni s letećim pepelom ima manju tlačnu čvrstoću. Porozni beton u kojem je 50% cementa zamijenjeno s letećim pepelom ima čvrstoću od 5,66 MPa.

**Propusnost poroznog betona:** Propusnost mješavina poroznog betona je oko 10 mm. Koeficijent propusnosti je od 12 do 16 mm/s. Manja propusnost je zabilježena kada je 20% cementa zamijenjeno s letećim pepelom. Kada je 50% cementa zamijenjeno s letećim pepelom, koeficijent propusnosti je 16 mm/s. Tablica 1.2, slika 3.3 pokazuje graf odnosa.

Tablica 1.2 Propusnost vode pri zamjeni cementa u određenom postotku s letećim pepelom [19]

Cement (%)	Leteći pepeo (%)	Permeabilnost
100	0	100
80	20	81
50	50	107



Slika 3.3 Odnos propusnosti[19]

Slika 3.4 Odnos poroznosti[19]

Tablica 1.3 Poroznost poroznog betona pri zamjeni cementa letećim pepelom u određenom postotku[19]

Cement (%)	Leteći pepeo (%)	Poroznost
100	0	100
80	20	92
50	50	89

**Tlačna čvrstoća poroznog betona:** Tlačna čvrstoća poroznog betona raste s vremenom (9 i 28 dana). To se događa zbog povećane hidratacije cementa i pucolanske reakcije letećeg pepela s vapnom oslobođenim prilikom hidratacije cementa. Mješavina poroznog betona u kojoj je 100% cementa i ta ista mješavina s 20% letećeg pepela pokazuje povećanje tlačne čvrstoće u vremenu (7 do 28 dana). Porozni beton s 50% letećeg pepela pokazuje povećanje tlačne čvrstoće od 50% za isto vrijeme. 28.dan je zabilježena tlačna čvrstoća od 10 MPa za mješavinu sa 100% cementa. Najmanja čvrstoća od 6 MPa je zabilježena za mješavinu s 50% letećeg pepela.



**Odnos između poroznosti i tlačne čvrstoće:** Odnos je prikazan pomoću sljedeće jednadžbe:

$$F = 0.71v + 26.6,$$

pri čemu je F tlačna čvrstoća 28. dan, a v poroznost u %.

**Zamjena cementa s drvenim prahom:** S porastom industrijalizacije, industrijski nusproizvodi ili otpaci se znatno povećavaju što dovodi do ekoloških i ekonomskih problema vezanih uz njihovo odlaganje, nasipanje zemljišta itd. Drveni prah je ostatak koji je nastao spaljivanjem drveta i njegovih proizvoda kako bi se proizvela energija ili u druge svrhe. Postoji nekoliko čimbenika koji utječu na kvalitetu i kvantitetu drvenog praha nastalog izgaranjem drveta. To olakšava izbor drvenih otpadaka prije njegovih korištenja u betonu. Ti čimbenici uključuju temperaturu izgaranja, vrstu i hidrodinamiku peći te vrstu stabla od kojeg je drvo dobiveno.

*Tablica 1.4 Kemijski sastav drvenog praha [19]*

Biomass group	SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
Birch bark	4.38	69.09	8.99	4.13	0.55	5.92	2.24	2.75	1.85	0.13
Forest residue	20.65	47.55	10.23	5.05	2.99	7.2	1.42	2.91	1.6	0.4
Pine bark	9.2	56.83	7.78	5.02	7.2	6.19	2.79	2.83	1.97	0.19
Pine chips	68.18	7.89	4.51	1.56	7.04	2.43	5.45	1.19	1.2	0.55
Poplar	3.87	57.33	18.73	0.85	0.68	13.11	1.16	3.77	0.22	0.28
Poplar bark	1.86	77.31	8.93	2.48	0.62	2.36	0.74	0.74	4.84	0.12
Sawdust	26.17	44.11	10.83	2.27	4.53	5.34	1.82	2.05	2.48	0.4
Spruce bark	6.13	72.39	7.22	2.69	0.68	4.97	1.9	1.88	2.02	0.12
Spruce wood	49.3	17.2	9.6	1.9	9.4	1.1	8.3	2.6	0.5	0.1
Wood residue	53.15	11.66	4.85	1.37	12.64	3.06	6.24	1.99	4.47	0.57

**Kapacitet upijanja vode:** Upijanje vode kod betonskih mješavina koje sadrže različite ostatke drvenog praha kao aditiva (5 - 30% od težine cementa).

**Ukupna gustoća:** U trenutku kad je vezivo većinom zamijenjeno s drvenim ostacima u prahu u cementnim mješavinama, dolazi do smanjivanja debljine što se pokazuje kritičnijim kad je postotak zamjene veći. Ukupna gustoća betonske mješavine je smanjena s 2482 kg/m<sup>3</sup> kod 0% drvenog praha na 2281 kg/m<sup>3</sup> kod 40% praha.

**Tlačna čvrstoća:** Tlačna kvaliteta čvrste smjese koja sadrži šljaku drveta staru 365 dana. Postotak zamjene je bio 5%, 8% i 12% od ukupne mase veziva. Na temelju rezultata izvedeni su sljedeći zaključci:

- Tlačna čvrstoća kontrolne mješavine je 28. dan iznosila 34 MPa, a 365. dan 44 MPa,
- Čvrstoća betonske mješavine s drvenim pepelom je 28. dan iznosila 33 MPa, a 365. dan između 42 i 46 MPa,
- Spajanje drvene šljake dovelo je do poboljšanja kvalitete čvrste mješavine unatoč činjenici da je površina betona smanjena 15%. To se pripisuje povećanoj aktivnosti pucolana.

*Tablica 1.5 Tlačna čvrstoća betona pri zamjeni cementa s drvenim prahom [19]*

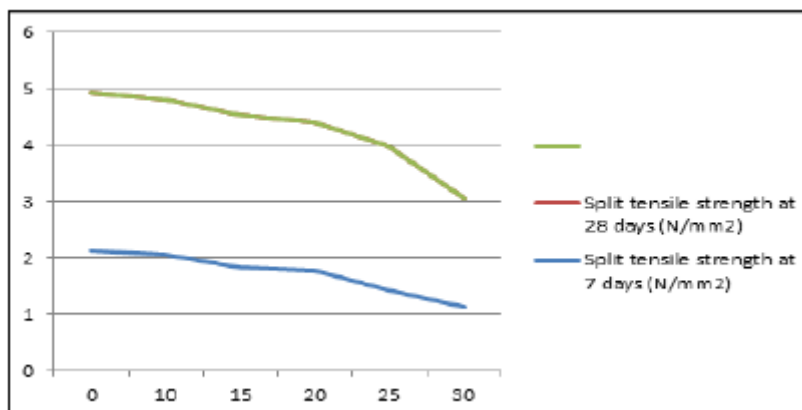
WWA content (%)	3 days strength (Mpa)	7 days strength (Mpa)	14 days strength (Mpa)	28 days strength (Mpa)
0	16.24 ± 0.10	16.85 ± 0.05	23.40 ± 0.46	28.35 ± 2.64
5	14.23 ± 1.04	15.31 ± 0.87	18.32 ± 0.67	24.61 ± 0.51
10	14.01 ± 0.86	15.31 ± 0.37	16.92 ± 0.75	21.86 ± 1.11
15	13.75 ± 0.62	14.18 ± 0.26	15.78 ± 0.68	21.73 ± 0.84
20	13.25 ± 0.47	14.10 ± 0.39	15.78 ± 0.68	20.55 ± 0.79
25	13.17 ± 0.36	14.05 ± 0.58	15.03 ± 0.88	20.35 ± 1.16
30	12.83 ± 0.30	13.88 ± 0.76	14.85 ± 0.25	19.52 ± 0.57

**Vlačna čvrstoća:** Uočeno je da:

- Vlačna čvrstoća kontrolne smjese bila je nakon 28 dana 3,8 MPa, a nakon 365 dana 4,3 MPa,
- Vlačna čvrstoća smjese cementa s drvenom šljakom bila je između 3,6 i 4,0 MPa nakon 28 dana te oko 4,2 i 5,1 MPa nakon 365 dana,
- Uglavnom, vlačna čvrstoća ponaša se kao i tlačna.

*Tablica 1.6 Vlačna čvrstoća betona [19]*

% Saw dust	Split tensile strength at 7 days (N/mm <sup>2</sup> )	Split tensile strength at 28 days (N/mm <sup>2</sup> )
0	2.14	2.8
10	2.05	2.76
15	1.83	2.69
20	1.79	2.61
25	1.44	2.53
30	1.14	1.91



Slika 3.5 Usporedba vlačne čvrstoće betona nakon 7 i nakon 28 dana [19]

**Zamjena cementa s pepelom rižine ljuske:** Rižina ljuska čini oko 1/5 od 300 milijuna tona riže koliko se godišnje proizvede u svijetu. Pepeo rižine ljuske se dobiva kao ostatak izgaranja rižine ljuske. Kontrolirano izgaranje rižine ljuske između 500 i 600 °C kroz kontrolirano vrijeme (oko 2 sata) stvara pepeo s niskim udjelom neizgorenog ugljika i silicija. U trenutku kad je rižina ljuska spaljena na nekontroliran način, vatreći ostaci, što je uglavnom silicij, mijenjaju svoju kristalnu strukturu i manje su osjetljivi. I kristalni i mutni pepeo rižine ljuske koristi se u izradi praškastog pepela rižine smjese ili Portland rižine ljuske ili ostataka rižine ljuske koji se mogu koristiti kao zamjena Portland cementu u betonu. Istraživanje u Indiji i u Americi je otkrilo da ako su strukture ili ljuske izložene gorenju pri kontrolirano niskoj temperaturi, vatreći ostaci mogu biti osnova za stvaranje pucolana koji je u osnovi isti kao (u nekim slučajevima čak i bolji od) silicij čiji dim i toplina u trenutku gorenja mogu biti korišteni za stvaranje snage.

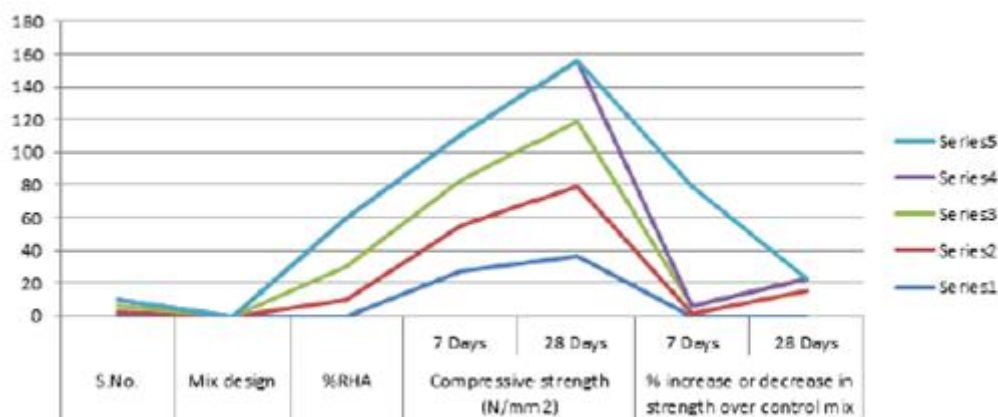
**Izrada smjese:** Mješavina je izrađena za razred betona M20 kao i po IS: 10262-2009, uz omjer 1:2.1:3.26. Tablica 1.7 pokazuje postotke zamjene i odnose pri izradi smjese 1 m<sup>3</sup> betona.

Tablica 1.7 Količina komponenti pri izradi mješavine [19]

Materijali	Udio po težini	Težina u kg
Cement	1	476.00
Leteći pepeo	1.25	595.00
Agregat (mm)	2.73	1299.48
W/C faktor	0.45	186.00

Tablica 1.8 Tlačna čvrstoća betona nakon 7 i nakon 28 dana [19]

S.No.	Mix design	%RHA	Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )		% increase or decrease in strength over control mix	
			7 Days	28 Days	7 Days	28 Days
1	M <sub>0</sub>	0	27.2	37	0	0
2	M <sub>1</sub>	10	27.8	42.8	2	15.67
3	M <sub>2</sub>	20	28.3	39.8	4	7.56
4	M <sub>3</sub>	30	27.4	37	0.73	



Slika 3.6 Tlačna čvrstoća betona [19]

Iz tablice 8, 7-dnevni test tlačne čvrstoće pokazao je da, s obzirom na dodatak pepela rižine ljuske, čvrstoća betona lagano je porasla, ovisno o podjeli u razrede. Za usporedbu, normalna tlačna čvrstoća je porasla 2% nakon dodatka pepela rižine ljuske u iznosu od 10%. Slično tome, čvrstoća je porasla za 4% nakon dodatka 20% pepela rižine ljuske i oko 1% nakon dodatka 30% pepela rižine ljuske normalnom betonu. Tijekom 28 dana, nakon dodatka od 10% pepela rižine ljuske betonu, došlo je do povećanja čvrstoće od 16% u odnosu na normalni. Kada je dodano 20% pepela rižine ljuske, povećanje je iznosilo oko 8%.

**Savojna čvrstoća:** Tlačna i vlačna čvrstoća betona usko su povezane jedna s drugom, ali nisu direktno proporcionalne. Drugim riječima, za veću tlačnu čvrstoću, beton pokazuje veću vlačnu čvrstoću. Korištenje pucolana daje cementu elastičnost, dok kod betona u koji je dodan pepeo rižine ljuske, savojna čvrstoća se povećava sa starosti betona. Nakon 28 - 56 dana, vidi se neznatno povećanje. Nakon 28 dana, manja je varijacija čvrstoće i neznatno povećanje u razdoblju stvrdnjavanja.

Tablica 1.9 Savojna čvrstoća [19]

Curing period	3 Days	7 Days	28 Days	56 Days
M20	1.01	1.17	4.21	4.95

**Utjecaj starosti na savojnu čvrstoću betona:** Savojna čvrstoća betona, uz zamjenu cementa s različitim postocima pepela rižine ljuske, za M20 dana je u tablici 1.10, u N/mm<sup>2</sup>.

Tablica 1.10 Utjecaj starosti na savojnu čvrstoću [19]

Curing period	3 Days	7 Days	28 Days
5%	1.22	1.36	4.21
7.5%	1.44	1.62	3.62
10%	1.34	1.41	3.84
12.5%	1.22	1.44	2.75
15%	1.04	1.25	2.24

### 3.1.3 Zaključak

Prema ispitivanjima i rezultatima, leteći pepeo, uz visoku poroznost, pokazuje manju tlačnu čvrstoću i visoku propusnost. Na temelju rezultata, odnosi između poroznosti i tlačne čvrstoće, poroznosti i propusnosti, uspostavljeni su za porozni beton čija poroznost varira od 15 - 30%. Kako raste postotak letećeg pepela, smanjuje se propusnost betona. Čestice drvenog praha su grublje nego cement u betonu i imaju veću specifičnu površinu u odnosu na cement zbog veće poroznosti i nepravilnog oblika. Ukupna gustoća povećava se s povećanjem postotka drvenog praha. Zamjena s drvenim prahom do 10% može se uspješno koristiti za izradu betona. Upijanje vode se povećava s povećanjem sadržaja drvenog praha. Uočeno je da tlačna čvrstoća betona neznatno raste dodavanjem pepela rižine ljuske od 10%, 20% i 30% betonu kroz 7 dana. Konačno, povećanjem zamjene cementu, obradivost betona se postupno smanjuje. Zamjena cementa s pepelom rižine ljuske dovodi do povećanja čvrstoće i bolje obradivosti.

	<b>Compressive strength</b>	<b>Water permeability</b>	<b>Porosity</b>	<b>Density</b>
<b>Fly ash</b>	The compressive strength increases with the increase in age of concrete.	The lower water permeability for 20% replacement of cement. For 50% same water permeability is showed.	It is not affected by partial replacement of cement by Fly ash.	The density increases with the increase in mix ratio %.
<b>Wood dust</b>	It increases with the increase in age of concrete.	Increase in wood dust percentage, The water permeability also increases.	There is no much change in the porosity after replacements.	Density reduces with the increase in replacement % of Wood dust.
<b>Rice husk ash</b>	The compressive strength increases with the increase in age of concrete.	The water permeability increases with the increase in % of replacement.	Porosity is better up to 20% replacement of cement with RHA.	The density of concrete decreases with the increase in % of replacement.

*Slika 3.7 Usporedba djelomičnih zamjena cementa s letećim pepelom, drvenastim prahom i pepelom rižinih ljuski [19]*

### **3.2 Eksperimentalno ispitivanje mineralnih aditiva u poroznom betonu: pregled(Prof. dr. K. B. Parikh, M. A. Shaikh, Adil A. Haji)**

#### **3.2.1 Sažetak**

Ovaj članak sadrži recenzije literature vezane za porozni beton i učinke mineralnih aditiva (leteći pepeo i silika) na svojstva betona. Razni znanstveni radovi, članci i teze upućeni su na razumijevanje različitih aspekata poroznog betona, tj. osnovnog ponašanja, prednosti, ograničenja, učinaka i mehaničkih svojstava. Razni znanstveni radovi, koji su do danas objavljeni, govore o različitim aspektima poroznog betona.

#### **3.2.2 Uvod**

Standardni, normalni, cementni beton obično se koristi kao građevinski materijal za zgrade. Nepropusnost betona pridonosi povećanom otjecanju vode u sustav odvodnje, preopterećujući infrastrukturu i uzrokujući prekomjerne poplave u izgrađenim područjima. Porozni beton je postao popularan tijekom posljednjih desetljeća zbog svog doprinosa u rješavanju pitanja okoliša.

Porozni beton je beton visokih performansi koji ima relativno visoku propusnost vode u usporedbi s konvencionalnim betonom zbog međusobno povezane strukture pora. Porozni beton se također naziva i propusnim betonom. Može se proizvoditi uobičajenim materijalima za izradu betona, cementom, dodacima cementu, svim vrstama krupnih i sitnih ili s manje sitnih frakcija agregata te vodom. Porozni beton je vrsta betona sa značajno visokom propusnošću vode u usporedbi s normalnim betonom. Uglavnom se razvio za potrebe odvodnje vode s površine zemlje tako da se smanji otjecanje otpadnih voda. Zbog velike propusnosti vode, porozni beton ima jako nisku tlačnu čvrstoću.

#### **3.2.3 Mineralni aditivi**

Mineralni aditivi su razni materijali koji se mogu nadodati betonu u relativno velikoj količini, obično u postotku od 15 - 60% težine cementa. Aditivi mogu biti pucolanski, cementni ili oboje. Prednosti korištenja mineralnih aditiva u betonu su povećanje čvrstoće, trajnosti, otpornosti na toplinsko krekiranje, bolja izdržljivost i ekonomičnost. Ovaj rad proučava utjecaje letećeg pepela i silike.

### 3.2.4 Porozni beton

Sanket Sharma (2012) utvrdio je kakav je utjecaj postotka sitnog agregata i cementa na krupni agregat, u svrhu proučavanja mehaničkih svojstava poroznog betona. Zaključak dobiven na temelju ispitivanja i rezultata je da uz dodatak 5% sitnog agregata u poroznom betonu, raste tlačna čvrstoća, ali daljnjim povećanjem postotka sitnog agregata, čvrstoća se smanjuje. U usporedbi s betonom u kojem nema sitnog agregata, savojna čvrstoća poroznog betona veća je 50% uz dodatak 10% sitnog agregata.

Jing Yang (2012) istraživao je učinak sitnijeg agregata, silike i superplastifikatora na povećanje čvrstoće poroznog betona. Na temelju rezultata, zaključak je da je korištenje agregata manje veličine poboljšalo čvrstoću poroznog betona. Silika i superplastifikator također povećavaju čvrstoću poroznog betona. Tlačna čvrstoća mješavina od ovih materijala može doseći i do 50 MPa i može se koristiti za izradu nogostupa i manje prometne ceste.

Rui Zhong (2015) proučavala je siliku i ultra fini prah silike u svrhu poboljšanja svojstava poroznog betona. Da bi se postigla jako dobra svojstva poroznog betona, korištene su mješavine s cementom čija je tlačna čvrstoća bila veća od 150 MPa i koje su imale visoku izdržljivost. Iz rezultata, na temelju poboljšanih mehaničkih svojstava i trajnosti, zaključeno je da je moguće proširiti područje primjene poroznog betona te na taj način omogućiti učinkovito sprječavanje rasta nepropusnih urbanih područja.

Baosha Huang (2009) proveo je eksperiment na poroznom betonu upotrebom lateks polimera, kako bi poboljšao čvrstoću. Upotrebom lateksa, prirodnog pijeska i vlakana, procijenio je učinak promjene polimera na mehanička i fizička svojstva poroznog betona. Na temelju rezultata, bilo je moguće proizvesti mješavine poroznog betona s prihvatljivom propusnošću i čvrstoćom, kombinacijom lateksa i pijeska.

Anthony Torres (2015) istraživao je utjecaj guste cementne paste na svojstva i promjenu mehaničkih svojstava poroznog betona. Korišten je vapnenac veličine 9,54 mm i 6,35 mm. Da bi se povećala debljina cementne paste, ostale varijable, kao što su vrsta cementa, vodocementni omjer, veličina uzorka, aditivi, svedene su na minimum. Na temelju ispitivanja i rezultata, zaključeno je da se propusnost poroznog betona smanjuje s povećanjem debljine cementne paste. Propusnost i poroznost su smanjene, ali su tlačna i vlačna čvrstoća povećane. Ukoliko debljina cementne paste postane prevelika, takav beton gubi svoju svrhu.



### 3.2.5 Mineralni aditivi u betonu: leteći pepeo

J.M.Khatib (2007) istraživao je utjecaj letećeg pepela na svojstva samozbijajućeg betona. Djelomice je zamijenio Portland cement s letećim pepelom u omjeru od 0 - 80%. Istraživana su sljedeća svojstva: obradivost, tlačna čvrstoća, apsorpcija i skupljanje. Na temelju istraživanja i rezultata zaključeno je da se visoki postotak letećeg pepela može koristiti za izradu samozbijajućegbetona prikladne čvrstoće. Zamjenom do 60% Portland cementa letećim pepelom može se proizvesti samozbijajućibeton čvrstoće  $40 \text{ N/mm}^2$ , a također se povećava i apsorpcija vode povećanjem udjela letećeg pepela. Zamjenom do 80% cementa letećim pepelom, može se smanjiti skupljanje za  $2/3$ .

Amitava Sil (2015) predstavio je učinak letećeg pepela u izradi betona s velikom koncentracijom letećeg pepela, koristeći od 5 do 10% silike za poboljšanje parametara čvrstoće betona. Na temelju rezultata, zaključujemo da zamjenom 50% cementa letećim pepelom, raste obradivost betona.

Ergal Yasar (2003) istraživao je svojstva čvrstoće laganog betona napravljenog od bazaltnog plovuča i letećeg pepela. U ovom istraživanju zamijenjeno je 20% cementa s letećim pepelom. Mjerena su tlačna i vlačna čvrstoća očvrstlog betona te gustoća i obradivost svježeg betona. Zaključeno je da je uporaba letećeg pepela u laganom betonu moguća te da se s njom smanjuju troškovi i zagađenje okoliša. Moguće je proizvesti lagani beton od letećeg pepela čija je tlačna čvrstoća 25 MPa.

Rafat Siddique (2013) napravio je studiju o svojstvima samozbijajućegbetona koji je izrađen od pepela ugljena. Mješavine su napravljene s tri postotka pepela ugljena (0, 10, 20 i 30) kao djelomične zamjene za fini agregat. Testovi su provedeni kroz period od 28 dana i rezultati su pokazali da su mješavine samozbijajućegbetona postigle tlačnu čvrstoću između 25,8 i 35,2 MPa. Otpornost na abraziju i apsorpcija vode mješavina samozbijajućeg betona se povećava s porastom pepela ugljena kroz određeno vrijeme.

Fereshteh Sabet (2013) je koristio mineralne aditive, prirodni zeolit, siliku i leteći pepeo, da bi istražio svojstva svježeg i očvrstlog betona. Za sve mješavine mjereno je: potreba za superplastifikatorom, tlačna čvrstoća, električna otpornost, apsorpcija vode i propusnost klorida. Rezultati ispitivanja su pokazali da je ugradnja mineralnih aditiva poboljšala mehanička svojstva i trajnost mješavina. Međutim, silika je malo učinkovitija od prirodnog zeolita ili letećeg pepela u poboljšanju trajnosti svojstava samozbijajućeg betona.

P. Nath (2011) istraživao je svojstva trajnosti visoke čvrstoće betona koji koristi veliku količinu letećeg pepela F klase, iz Zapadne Australije. Kao ispitni uzorci korištene su mješavine betona s letećim pepelom od 30% do 40% ukupnog veziva. Tlačna čvrstoća betonske smjese nakon 28 dana iznosila je 65 do 85 MPa. Uzorci betona s letećim pepelom pokazali su manje skupljanje nego uzorci kontrolnog betona. Općenito, ugradnja letećeg pepela kao djelomične zamjene cementa poboljšava svojstva trajnosti betona.

Rahul Bansal (2015) proučavao je osnovnu zamjenu cementa letećim pepelom. Uočeno je da se dodatkom letećeg pepela od 10% smanjuje tlačna čvrstoća betona za 20% i 50% za period od 7 i 28 dana. Pri zamjeni od 20%, zabilježen je porast tlačne čvrstoće od 7% i 11% kroz period od 7 i 28 dana. Pri zamjeni od 30%, povećanje tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana, iznosilo je 23% i 19%. Zaključak je da se povećanjem sadržaja letećeg pepela, tlačna čvrstoća betona povećava, ali i smanjuje. Također je uočeno da povećanjem vremena raste tlačna čvrstoća u betonu s letećim pepelom.

#### c) Učinci silike na beton

M. Mazloom (2003) proučavao je efekt silike na mehanička svojstva betona visoke čvrstoće. Cilj ovog istraživanja je bio ispitati učinke veziva koje sadrži različite količine silike i mehanička svojstva betona. Rezultati ovog istraživanja pokazali su da se povećanjem udjela silike, smanjuje obradivost betona, ali rastu kratkotrajna mehanička svojstva kao što je 28 - dnevna tlačna čvrstoća. Također, postoci zamjene cementa silikom nisu imali značajan utjecaj na ukupno skupljanje, međutim autogeno skupljanje betona se povećalo s povećanjem udjela silike. Osim toga, puzanje betona se smanjilo s povećanjem udjela silike.

V.T.Giner (2011) proučavao je utjecaj dodatka silike u rasponu od 0% do 15% cementa na dinamička i statička mehanička svojstva betona. Rezultati su pokazali da se dodavanjem silike ili zamjenom cementa silikom smanjuje i dinamički modul elastičnosti i koeficijent prigušenja betona. Dinamička elastična svojstva betona, sa i bez silike, imaju veće vrijednosti od statičkih. Ove razlike su manje kod betona koji sadrže siliku.

N.K.Amudhavali (2012) istraživao je tlačnu, savojnu i vlačnu čvrstoću betona M35, u kojem je umjesto cementa dodavao siliku u raznim postocima. Rezultati su pokazali da zamjenom cementa silikom od 10% do 15%, raste tlačna čvrstoća betona. Ali u drugim

mješavinama, uočen je gubitak težine i smanjenje postotka tlačne čvrstoće za 2,23 i 7,69 kada se 10% cementa zamijeni silikom.

### 3.2.6 Zaključak

- Porozni beton ima sadržaj pora od 15% do 35% ukupnog volumena betona što mu omogućuje veću propusnost, što i jest svrha ovog betona. Ali, s druge strane, veća propusnost znači manju tlačnu čvrstoću poroznog betona u odnosu na obični.
- Korištenje sitnog pijeska u rasponu od 5% do 10% može osigurati dovoljnu čvrstoću poroznog betona. Ali, daljnje povećanje pijeska može utjecati na čvrstoću svojstava poroznog betona.
- Tlačna čvrstoća poroznog betona varira od 15 do 20 MPa. Ali, modifikacijama krupnih agregata, može se povećati tlačna čvrstoća za 12% do 14%.
- Zamjena cementa letećim pepelom do 40% povećava tlačnu čvrstoću betona. Leteći pepeo, koji zamjenjuje do 50% cementa, osigurava veću obradivost betona.
- Općenito, zamjenom cementa letećim pepelom, dobiva se tlačna čvrstoća betona u rasponu od 25 do 35 MPa. Ali, s modificiranom izradom betona s letećim pepelom, tlačna čvrstoća može iznositi od 80 do 100 MPa.
- Korištenje silike u betonu na početku daje visoku čvrstoću, ali s povećanjem udjela silike dolazi do smanjenja čvrstoće i obradivosti betona.
- Leteći pepeo je jeftiniji od silike. U svrhu povećanja čvrstoće, može se koristiti leteći pepeo kao jeftiniji dodatak s većim učinkom na čvrstoću betona.

Postizanje veće čvrstoće i obradivosti u poroznom betonu nije moguće s običnim betonskim mješavinama. Neophodna je modifikacija. Korištenjem letećeg pepela i silike, moguće je postići veću čvrstoću poroznog betona.

### **3.3 Eksperimentalno istraživanje o djelomičnoj zamjeni cementa s pepelom palme u betonu (K. Sathish Kumar, S. Dilli Babu)**

#### **3.3.1 Sažetak**

Cement je osnovni građevinski materijal koji služi za izradu betona i osigurava dobru vezu između agregata te visoku čvrstoću. Međutim, tijekom proizvodnje, cement ispušta veliku količinu CO<sub>2</sub>. Da bi se smanjio štetan utjecaj na okoliš i da bi se poboljšala svojstva betona, koristi se pepeo palme kao djelomična zamjena cementu u betonu. Postoci zamjene su 10%, 20% i 30%. U ovoj studiji su istražena i uspoređena svojstva betona, kao što su tlačna čvrstoća i trajnost, između običnog betona i betona s dodatkom pepela palme. Beton s dodatkom pepela palme je vrlo ekonomičan i ima pozitivan utjecaj na okoliš.

#### **3.3.2 Uvod**

Cement je vezivni materijal koji daje dobru povezanost između agregata te visoku čvrstoću. Ali, za proizvodnju jedne tone cementa, ispušteno je 1,2 tona CO<sub>2</sub> što predstavlja opasnost za okoliš. Količina CO<sub>2</sub> ispuštenog tijekom proizvodnje cementa čini 8% ukupnog CO<sub>2</sub> ispuštenog u atmosferu. Isto tako, potrebna je velika količina struje za proizvesti jednu tonu cementa. Trošak jedne vreće cementa jako je visok. Da bi se smanjila količina struje i količina CO<sub>2</sub> koji se ispušta u atmosferu, cement se zamjenjuje dodacima kao što je pepeo palme.

Proizvodnja palminog ulja stvara znatnu količinu nusproizvoda krutog otpada u obliku vlakana i ljuski. Ti se otpadi spaljuju i dobije se takozvani pepeo palme. Taj pepeo se koristi na polju, ali on nema dovoljno hranjivih tvari da se može koristiti kao gnojivo. To uzrokuje degradaciju okoliša i zagađenje. Eksperimentalna istraživanja o pepelu palme pokazala su da su njegova svojstva slična svojstvima cementa. Zato se cement djelomično zamjenjuje palminim pepelom. Postoci u kojima se zamjenjuje su 10%, 20% i 30%. Betonske kocke su lijevane. Mjerena je tlačna čvrstoća u različitom vremenu. Također je određena trajnost betonskih kocki. Rezultati pokazuju da beton napravljen od palminog pepela daje visoku čvrstoću, trajnost te je također ekonomski i ekološki isplativ.

### 3.3.2 Svojstva materijala

Beton je izrađen od različitog postotka palminog pepela kao vezivnog materijala, cementa, pijeska i krupnog agregata. Cement se dodaje u betonsku mješavinu M20 u postotku od 0 do 30% težine cementa.

U ovom istraživanju korišten je Portland cement razreda 53 prema IS 8112 – 1976. Specifična težina cementa je 3,15.

Koristio se prirodni riječni pijesak veličine ispod 4,75 mm, specifične težine 2,6, modula finoće 2,36 i gustoće  $1415 \text{ kg/m}^3$ .

Također je korišten krupni kameni agregat veličine 12 mm, specifične težine 2,66 te gustoće  $1383 \text{ kg/m}^3$ .

Pepeo palme je pepeo dobiven spaljivanjem palminih vlakana i ljuski nakon proizvodnje palminog ulja. To je otpadni materijal. Veličina pepela palme koji se koristi u ovom istraživanju je manja od  $90\mu$ . Specifična težina je 2,6.

### 3.3.3 Kemijski sastav

Kemijski sastav koji se koristi u ovom istraživanju, dan je u tablici ispod.

*Tablica 1.11 Kemijski sastav palminog pepela [20]*

Component	% Content
CaO	58
SiO <sub>2</sub>	14.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.12
K <sub>2</sub> O	0.32
SO <sub>2</sub>	0.53

### 3.3.4 Uzorci

Broj uzoraka koji se radi za određeni postotak zamjene cementa palminim pepelom da bi se izračunala tlačna čvrstoća, dan je u tablici ispod.

*Tablica 1.12 Broj uzoraka za izračunavanje čvrstoće [20]*

<b>Specimen</b>	<b>No. of cubes</b>
Conventional concrete	9
Concrete with 10% palm ash	9
Concrete with 20% palm ash	9
Concrete with 30% palm ash	9

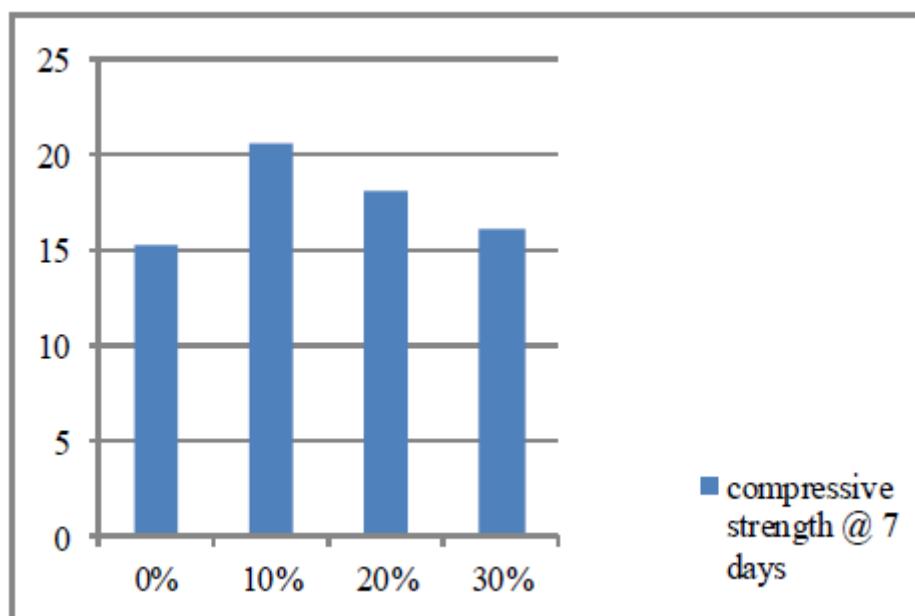
*Tablica 1.13 Količine materijala koje su potrebne za različite postotke palminog pepela u betonskoj mješavini za jednu kocku [20]*

<b>Specimen</b>	<b>Cement (Kg)</b>	<b>Palm ash (Kg)</b>	<b>Fine aggregate (Kg)</b>	<b>Coarse aggregate (Kg)</b>
Conventional concrete	1.29	0	1.88	4.128
Concrete with 10% PA	1.161	0.129	1.88	4.128
Concrete with 20% PA	1.032	0.258	1.88	4.128
Concrete with 30% PA	0.903	0.387	1.88	4.128

Na kraju perioda očvršćavanja betona, nakon 7, 14 i 28 dana, uzmu se dvije kocke iste veličine. Kocke se obrišu čistom krpom i izmjere se dimenzije kocki na licu mjesta. Odredi se težina uzoraka. Zatim se betonska kocka stavi u prešu i lagano opterećuje. Zapišemo posljednje opterećenje na kojem se kocka slomi i iz njega se izračuna tlačna čvrstoća.

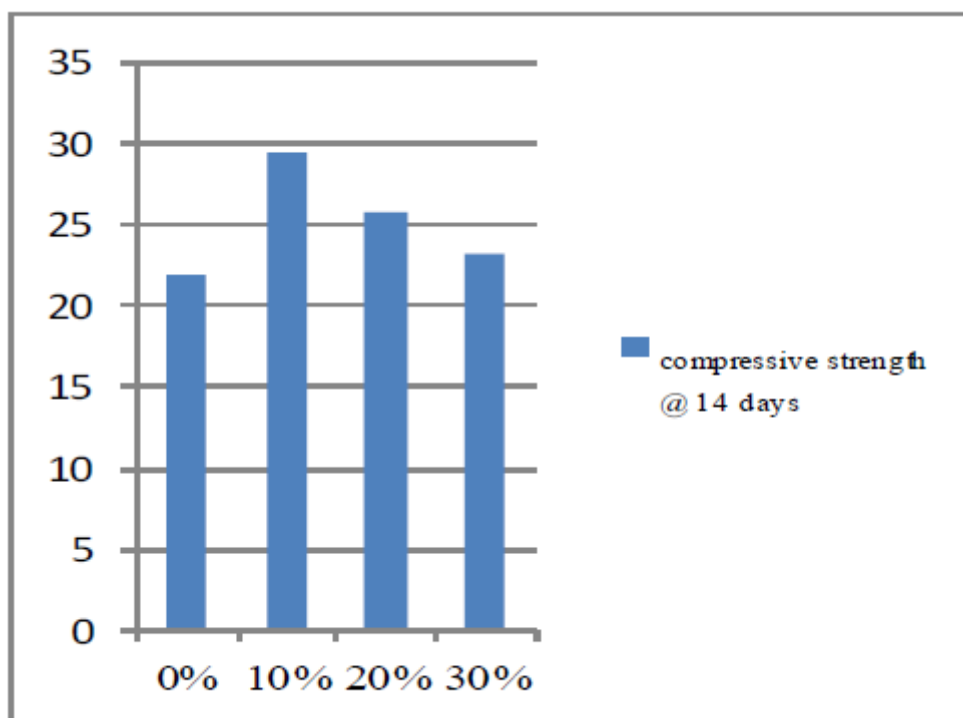
Tablica 1.14 Tlačna čvrstoća nakon 7 dana [20]

S.No	Specimen	Average compressive strength
1	Conventional concrete	15.23
2	Concrete with 10% palm ash	20.56
3	Concrete with 20% palm ash	18.10
4	Concrete with 30% palm ash	16.12



Slika 3.8 Tlačna čvrstoća nakon 7 dana [20]

Tablica 1.15 Tlačna čvrstoća nakon 14 dana [20]



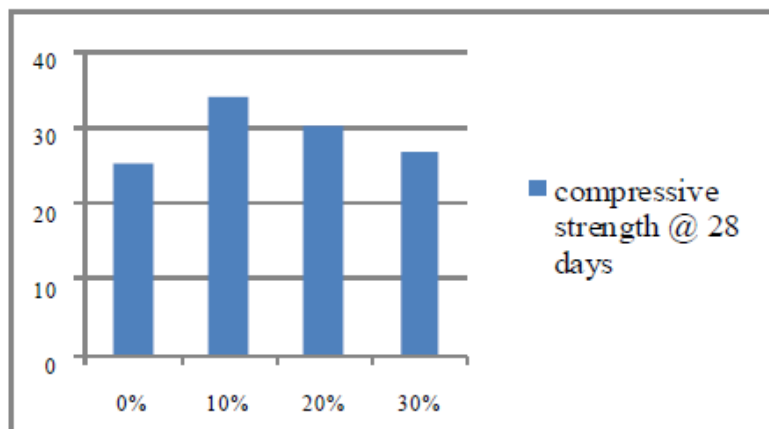
S. No	Specimen	Average compressive strength
1	Conventional concrete	21.34
2	Concrete with 10% palm ash	29.56
3	Concrete with 20% palm ash	25.90
4	Concrete with 30% palm ash	23.14

Slika 3.9 Tlačna čvrstoća nakon 14 dana [20]



Tablica 1.16 Tlačna čvrstoća nakon 28 dana [20]

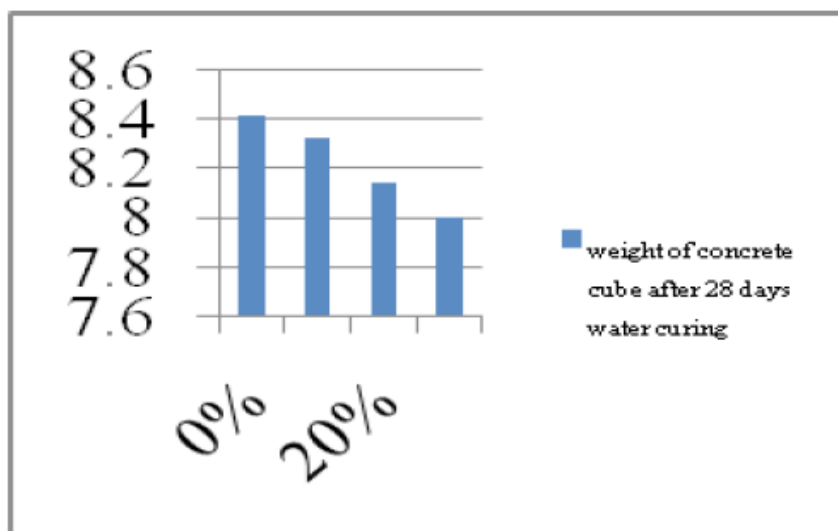
S. No	Specimen	Average compressive strength
1	Conventional concrete	25.41
2	Concrete with 10% palm ash	34.28
3	Concrete with 20% palm ash	30.16
4	Concrete with 30% palm ash	26.87



Slika 3.10 Tlačna čvrstoća nakon 28 dana [20]

Tablica 1.17 Težina betonskih kocki nakon 28 dana [20]

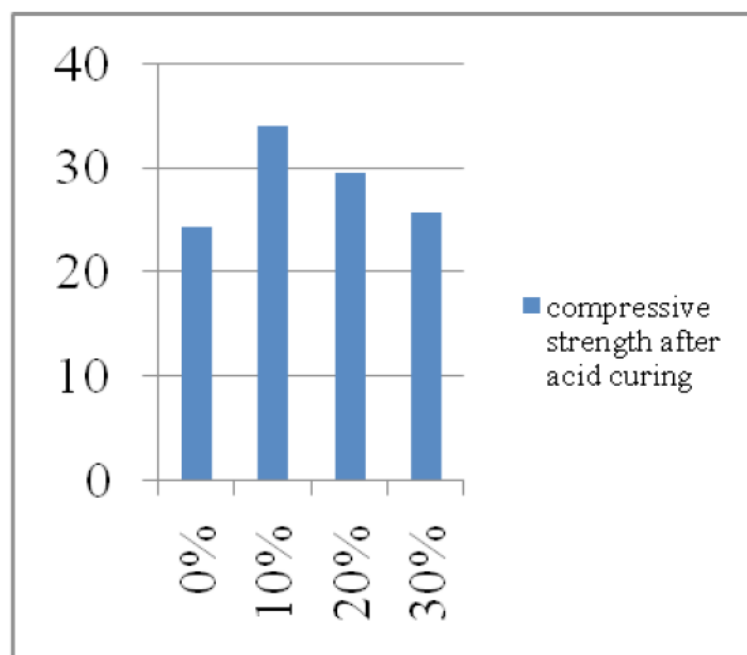
Specimen	No. of cubes	Average weight of cube in kg
Conventional concrete	3	8.41
Concrete with 10% palm ash	3	8.32
Concrete with 20% palm ash	3	8.14
Concrete with 30% palm ash	3	8.06



Slika 3.11 Težina betonskih kocki nakon 28 dana [20]

Tablica 1.18 Tlačna čvrstoća nakon stvrdnjavanja [20]

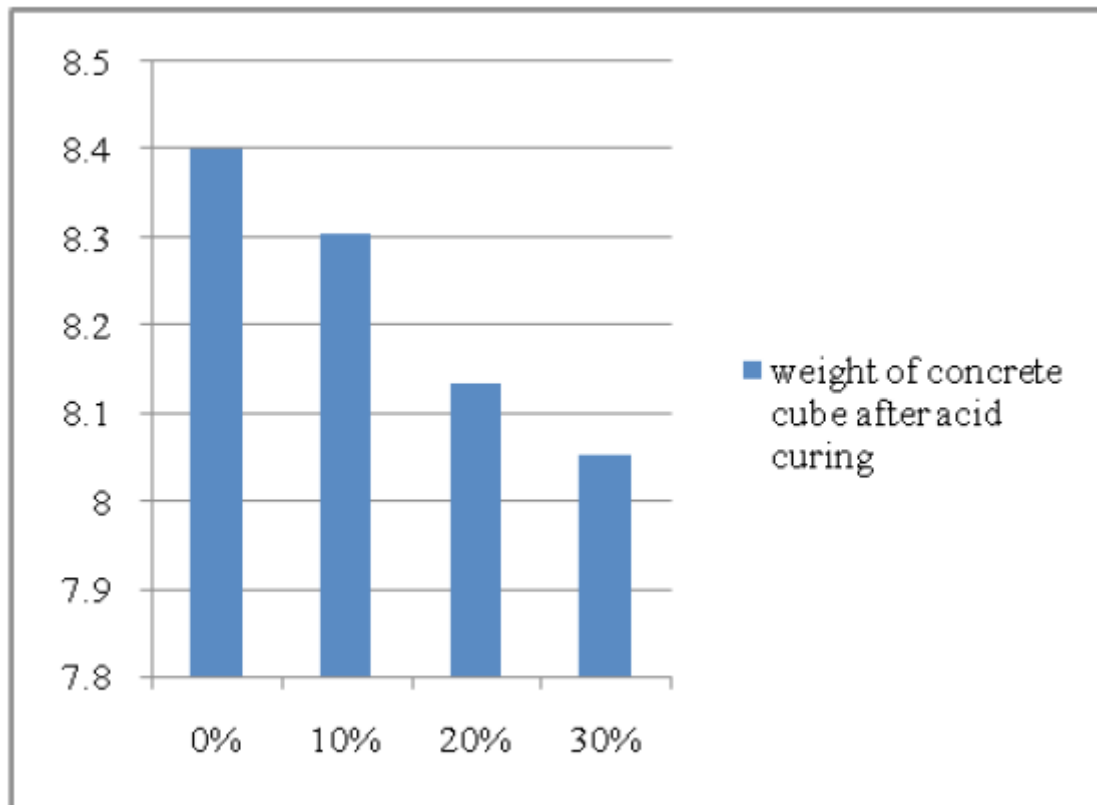
S. No.	Specimen	Average compressive strength
1	Conventional concrete	25.26
2	Concrete with 10% palm ash	33.91
3	Concrete with 20% palm ash	29.51
4	Concrete with 30% palm ash	25.63



Slika 3.12 Tlačna čvrstoća nakon stvrdnjavanja [20]

Tablica 1.19 Težina betonske kocke nakon stvrdnjavanja [20]

Specimen	No. of cubes	Average weight of cube in kg
Conventional concrete	3	8.401
Concrete with 10% palm ash	3	8.305
Concrete with 20% palm ash	3	8.133
Concrete with 30% palm ash	3	8.052



Slika 3.13 Težina betonske kocke nakon stvrdnjavanja [20]

### 3.3.5 Zaključak

Izvučeni su sljedeći zaključci iz istraživanja:

- Djelomična zamjena cementa palminim pepelom u betonu uzrokuje varijacije čvrstoće.
- U usporedbi s konvencionalnim betonom, palmin pepeo pokazuje visoku čvrstoću.
- Trajnost (otpornost na kiseline) betona od palminog pepela također je veća nego trajnost konvencionalnog betona.
- Zamjena smanjuje gustoću betonske kocke.
- Dodatkom palminog pepela betonu, smanjuje se zagađenje. Palmin pepeo se smatra ekološki povoljnim materijalom.

### 3.4 Utjecaj sastava i načina ugradnje na svojstva poroznih betona (I.Brnas)

#### 3.4.1 Uvod

Ovo istraživanje ima za cilj ispitati kako sastav i način ugradnje poroznog betona utječu na njegova svojstva. Potrebno je izraditi mješavinu koja će imati veliku propusnost, uz zadovoljavajuću vrijednost čvrstoće. U tu svrhu, izrađeno je 8 mješavina poroznog betona. Najveću propusnost ima mješavina B<sub>8</sub>, frakcije 8 – 16 mm, koja je napravljena od drobljenog agregata te ugrađena vibriranjem na vibrostolu. Slijedi je mješavina B<sub>6</sub>, frakcije 11,2 – 16 mm, napravljena od drobljenog agregata te ugrađena zbijanjem drvenom letvom. Najveću poroznost ima mješavina B<sub>7</sub> koja je izrađena od drobljenog agregata frakcije 8 – 16 mm te ugrađena zbijanjem drvenom letvom.

Na navedenim uzorcima poroznog betona ispitana je konzistencija u svježem stanju te tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem, propusnost i poroznost u očvrslom stanju.

#### 3.4.2 Korišteni materijali

Prilikom izrade poroznih mješavina, korišteni su sljedeći materijali:

- Cement CEM II/B-S 42,5 N
- Agregat
- Voda.

#### 3.4.3 Proračun sastava poroznog betona

U sljedećim tablicama prikazan je proračun sastava poroznog betona mješavina B<sub>6</sub>, B<sub>7</sub> i B<sub>8</sub>.

*Tablica 1.20 Receptura za mješavinu B<sub>6</sub> [26]*

SASTOJAK	MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOĆA [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 LITARA [kg]
CEMENT	350,00	3,10	112,90	7,00
VODA	122,50	1,00	122,50	2,45
V/C 0,35				
ZRAK [%] 21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT	1486,32	2,68	554,60	29,73
UKUPNO	1958,82		1000,00	39,18

Tablica 1.21 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata [26]

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11,2	0,00	0,00	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
11,2 - 16	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
CEMENT		350,00					350,00	7,00
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	2,64

Tablica 1.22 Receptura za mješavinu B<sub>7</sub> [26]

SASTOJAK	MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOĆA [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 LITARA [kg]
CEMENT	350,00	3,10	112,90	7,00
VODA	122,50	1,00	122,50	2,45
V/C 0,35				
ZRAK [%] 21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT	1486,32	2,68	554,60	29,73
UKUPNO	1958,82		1000,00	39,18

Tablica 1.23 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata [26]

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 16	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
16 - 32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CEMENT		350,00					350,00	7,00
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	2,64

Tablica 1.24 Receptura za mješavinu B<sub>8</sub> [26]

SASTOJAK	MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOĆA [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 LITARA [kg]
CEMENT	250,00	3,10	80,65	5,00
VODA	87,50	1,00	87,50	1,75
V/C 0,35				
ZRAK [%] 21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT	1666,57	2,68	621,85	33,33
UKUPNO	2004,07		1000,00	40,08

Tablica 1.25 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata [26]

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 16	100,00	1666,57	0,75	12,50	0,10	1,67	1655,74	33,11
16 - 32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CEMENT		250,00					250,00	5,00
VODA		87,50		12,50		1,67	98,33	1,97

### 3.4.4 Rezultati ispitivanja poroznosti

U očvrslom stanju ispitane su poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća cijepanjem.

Najveću poroznost iznosa 36,4% ima mješavina B<sub>7</sub>, frakcije 8 – 16 mm, napravljena od drobljenog agregata i ugrađena zbijanjem drvenom letvom. Slijedi je mješavina B<sub>3</sub>, frakcije 11,2 – 16 mm, napravljena od prirodnog agregata te ugrađena zbijanjem čeličnom šipkom.

Mješavina B<sub>6</sub> ima četvrtu najveću poroznost, iznosa 34%, dok mješavina B<sub>8</sub> ima petu najveću poroznost, iznosa 33,3%

Tablica 1.26 Prikaz rezultata ispitivanja poroznosti [26]

Oznaka	Dimenzije			Volumen	Masa pod vodom	Masa na zraku	Poroznost	Gustoća
	a (mm)	b (mm)	c (mm)	(mm <sup>3</sup> )	(g)	(g)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )
B <sub>7</sub>	150	150	151,5	3408750	3675,4	5843,9	36,4	1714,38
B <sub>3</sub>	150	150	150,0	3375000	3645,1	5820,3	35,5	1724,53
B <sub>5</sub>	150	150	152,0	3420000	3812,3	6066,1	34,1	1773,71
B <sub>6</sub>	150	150	151,5	3408750	3827,1	6077,1	34,0	1782,79
B <sub>8</sub>	150	150	154,0	3465000	3830,0	6141,0	33,3	1772,29
I-2	150	150	152,5	3431250	3878,0	6220,0	31,7	1812,75
B <sub>2</sub>	150	150	152,5	3431250	3899,2	6252,8	31,4	1822,31
B <sub>1</sub>	150	150	153,0	3442500	3925,5	6371,8	28,9	1850,92
I-3	150	150	151,5	3408750	4091,0	6554,0	27,7	1922,70
B <sub>4</sub>	150	150	152,5	3431250	4187,0	6794,7	24,0	1980,24

### 3.4.5 Rezultati ispitivanja propusnosti

Propusnost poroznog betona ispitana je prema dvije metode, metodi padajuće razine stupca vode i metodi stalne razine stupca vode. Mješavina B<sub>8</sub> ima najveću vrijednost propusnosti u iznosu od 28,70 mm/s po metodi padajuće razine stupca vode, odnosno 24,12 mm/s po metodi stalne razine stupca vode. Mješavina B<sub>6</sub> ima drugu najveću vrijednost propusnosti, a slijedi je mješavina B<sub>7</sub>. Tablica 1.25 prikazuje rezultate ispitivanja propusnosti po obje navedene metode.

Tablica 1.27 Prikaz rezultata ispitivanja propusnosti [26]

Oznaka	Uzorak			Metoda padajuće razine				Metoda stalne razine		
	Promjer	Visina	Površina	H <sub>g</sub>	H <sub>e</sub>	Vrijeme	k <sub>1</sub>	Volumen	Vrijeme	k <sub>2</sub>
-	(mm)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(mm)	(mm)	(s)	(mm/s)	(mm <sup>3</sup> )	(s)	(mm/s)
B <sub>8</sub>	103	204	8332,3	300	100	7,80	28,70	8867000	30	24,12
B <sub>6</sub>	103	203	8332,3	280	80	8,76	29,00	8115000	30	23,54
B <sub>7</sub>	103	200	8332,3	280	80	9,03	27,72	7768000	30	22,20
B <sub>5</sub>	103	211	8332,3	280	80	11,10	23,79	6680000	30	20,14
B <sub>4</sub>	103	202	8332,3	280	80	11,70	21,60	5628000	30	16,24
B <sub>2</sub>	103	199	8332,3	280	80	17,23	14,45	4168000	30	11,85
I-3	103	196	8332,3	300	100	17,00	12,65	4156000	30	10,86
B <sub>3</sub>	103	206	8332,3	290	90	21,98	10,95	3120000	30	8,87
B <sub>1</sub>	103	211	8332,3	300	100	27,65	8,37	2579000	30	7,26
I-2	103	200	8332,3	300	100	27,00	8,13	2610000	30	6,96



### 3.4.6 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća mješavine B<sub>6</sub> iznosi 14,77 MPa, a vrijednost tlačne čvrstoće mješavine B<sub>8</sub> iznosi 12,50 MPa. Očekivano, mješavine B<sub>7</sub> i B<sub>3</sub>, koje su imale najveće vrijednosti poroznosti, imaju najmanje vrijednosti tlačne čvrstoće.

Tablica 1.28 Prikaz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće [26]

Oznaka	Masa (g)		Tlačna čvrstoća f <sub>c</sub> (MPa)		Sila loma F (N)		Dimenzije			Volumen (mm <sup>3</sup> )	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )
							a (mm)	b (mm)	c (mm)		
B <sub>1</sub>	7109	7124,67	20,5	22,73	453,3	508,70	150,00	150,00	153,00	3442500	2069,62
	7144		25,2		566,1						
	7121		22,5		506,7						
B <sub>4</sub>	6997	7106,03	20,2	20,30	454,0	456,70	150,00	150,00	152,67	3435075	2068,67
	7066		18,9		426,0						
	7256		21,8		490,1						
I-3	6788	6887,30	17,8	18,90	444,6	425,33	150,00	150,00	151,67	3412575	2018,21
	6901		19,8		398,3						
	6972		19,1		433,1						
B <sub>5</sub>	6583	6677,00	18,0	18,83	405,4	423,93	150,00	150,00	152,00	3420000	1952,34
	6599		18,0		404,7						
	6849		20,5		461,7						
I-2	6503	6557,70	13,9	14,90	312,5	335,30	150,00	150,00	152,33	3427425	1913,30
	6573		15,4		341,2						
	6597		15,4		352,2						
B <sub>6</sub>	6281	6332,00	14,0	14,77	315,8	332,30	150,00	150,00	151,33	3404925	1859,66
	6335		15,3		343,8						
	6380		15,0		337,3						
B <sub>8</sub>	6287	6317,67	11,9	12,50	267,8	281,40	150,00	150,00	154,33	3472425	1819,38
	6398		12,5		280,9						
	6268		13,1		295,5						
B <sub>2</sub>	6670	6637,30	10,6	10,67	237,8	240,17	150,00	150,00	152,67	3435075	1932,21
	6560		10,2		230,6						
	6682		11,2		252,1						
B <sub>7</sub>	6123	6123,67	8,6	10,03	192,8	225,47	150,00	150,00	151,67	3412575	1794,44
	6206		11,7		262,2						
	6042		9,8		221,4						
B <sub>3</sub>	6220	6220,53	10,0	9,87	225,7	222,13	150,00	150,00	149,33	3359925	1851,39
	6216		10,1		226,7						
	6226		9,5		214,0						

### 3.4.7 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

Najveću vlačnu čvrstoću cijepanjem ima mješavina B<sub>1</sub>, frakcije 8 – 11,2 mm, napravljena od prirodnog agregata i ugrađena zbijanjem čeličnom šipkom. Mješavine B<sub>6</sub> i B<sub>8</sub> pokazuju vlačne čvrstoće u iznosu 1,66 MPa, odnosno 1,54 MPa. Mješavina B<sub>7</sub> ima najmanju vrijednost vlačne čvrstoće u iznosu od 1,16 MPa.

Tablica 1.29 Prikaz rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće [26]

Oznaka	Masa	Promjer	Visina	Volumen	Gustoća	F	f <sub>ct</sub>
	(g)	(mm)	(mm)	(cm <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(N)	(MPa)
B <sub>1</sub>	4683	111	230	2224,6	2105,3	91,6	2,29
B <sub>5</sub>	4291	112	230	2264,8	1894,6	73,9	1,83
B <sub>4</sub>	4635	112	230	2264,8	2046,7	71,8	1,78
I-3	4632	114	232	2366,8	1957,0	69,8	1,68
I-2	4592	114	231	2356,6	1948,5	69,1	1,67
B <sub>6</sub>	4218	113	229	2295,4	1837,6	67,3	1,66
B <sub>3</sub>	4587	112	229	2255,0	2034,3	63,8	1,58
B <sub>8</sub>	4210	113	230	2305,4	1826,1	62,8	1,54
B <sub>2</sub>	4427	111	230	2224,6	1990,1	48,6	1,21
B <sub>7</sub>	4058	113	229	2295,4	1767,9	47,3	1,16

### 3.4.8 Zaključak

- Najbolje rezultate poroznosti imaju mješavine ugrađene drvenom letvom i čekićem, dok one ugrađene vibriranjem imaju nešto manje vrijednosti poroznosti. U narednim istraživanjima, trebalo bi smanjiti vrijeme vibriranja od 40 sekundi. Poroznost je proporcionalna povećanju sadržaja cementa.
- Mješavine koje su napravljene s manjim frakcijama agregata imaju manje propusnosti, a povećanjem sadržaja cementa dolazi do povećanja propusnosti.
- Najveće vrijednosti tlačne čvrstoće imaju mješavine koje su ugrađene vibriranjem na vibrostolu i zbijanjem čeličnom šipkom. Tlačna čvrstoća raste kako se sadržaj cementa smanjuje.
- Mješavine koje su napravljene s užim rasponom frakcija agregata imaju veće vlačne čvrstoće cijepanjem. Povećanjem količine cementa dolazi do povećanja vlačne čvrstoće.

## 4 EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog istraživanja je izrada poroznog betona s dodacima koji ima dobru propusnost i poroznost, a istovremeno i zadovoljavajuću čvrstoću. Navedene karakteristike su se nastojale zadovoljiti optimalnim sadržajem komponenti betona (agregata, cementa, vode te dodataka silike i letećeg pepela).

Karakteristike tog poroznog betona uspoređuju se s karakteristikama poroznog betona bez dodataka, odnosno s najboljim mješavinama napravljenim za potrebe diplomskog rada [26]. Odabrana je mješavina B<sub>7</sub> kao polazna, iako su mješavine B<sub>6</sub> i B<sub>8</sub> imale najbolje rezultate propusnosti uz istovremeno zadovoljavajuće vrijednosti tlačne čvrstoće.

Mješavina B<sub>7</sub> je odabrana zato što ima zadovoljavajuću propusnost, napravljena je od drobljenog agregata frakcije 8 – 16 mm te ga nije potrebno razdvajati na podfrakcije kao kod mješavine B<sub>6</sub>, a ima dovoljnu količinu cementa od 350 kg/m<sup>3</sup> da se dio cementa može zamijeniti s nekim dodatkom. Varirajući dodatke i način ugradnje, pokušat će se povećati postignuta čvrstoća od 10,03 MPa. U radu će se dati i ocjena novih mješavina u odnosu na mješavine B<sub>6</sub> i B<sub>8</sub>.

Napravljeno je 8 mješavina poroznog betona s dodacima koje se međusobno razlikuju sadržajem komponenti.

P<sub>1</sub> - mješavina frakcije 8 - 16 mm, napravljena uz dodatak silike u iznosu od 10%, ugrađena zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom

P<sub>2</sub> - mješavina frakcije 8 - 16 mm, napravljena uz dodatak silike u iznosu od 20%, ugrađena zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom

P<sub>3</sub> - mješavina frakcije 8 - 16 mm, napravljena uz dodatak silike u iznosu od 30%, ugrađena zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom

P<sub>4</sub> - mješavina frakcije 8 - 16 mm, napravljena uz dodatak silike u iznosu od 14,28%, ugrađena zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom

P<sub>5</sub> - mješavina frakcije 8 - 16 mm, napravljena uz dodatak letećeg pepela u iznosu od 10%, ugrađena vibriranjem na vibrostolu

P<sub>6</sub> - mješavina frakcije 8 - 16 mm, napravljena uz dodatak letećeg pepela u iznosu od 20%, ugrađena vibriranjem na vibrostolu

P<sub>7</sub> - mješavina frakcije 8 - 16 mm, napravljena uz dodatak letećeg pepela u iznosu od 30%, ugrađena vibriranjem na vibrostolu

P<sub>8</sub> - mješavina frakcije 8 - 16 mm, napravljena uz dodatak letećeg pepela u iznosu od 15%, ugrađena vibriranjem na vibrostolu

Beton je ispitan u svježem i u očvrslom stanju. Nakon ispitivanja konzistencije metodom oblikovanja kuglice, ispituje se i konzistencija betona metodom slijeganja. Zatim se mješavina ugrađuje u 4 kalupa oblika kocke, dimenzija 150x150x150 mm, te u 2 kalupa oblika valjka. Nakon 24 sata, uzorci su izvađeni iz kalupa te su prebačeni u vlažnu komoru, gdje se čuvaju na temperaturi  $20 \pm 2$  °C. U očvrslom stanju ispitana je tlačna čvrstoća nakon 28 dana, vlačna čvrstoća, propusnost i poroznost.

#### **4.1 Korišteni materijali**

Prilikom izrade mješavina poroznog betona s dodacima, korišteni su sljedeći materijali:

- Agregat,
- Cement CEM II/ B-S 42,5 N,
- Voda,
- Leteći pepeo,
- Silika.

##### **4.1.1 Cement**

Cement koji je korišten pri izradi mješavina poroznog betona je CEM II/B-S 42,5 N. Potječe iz tvornice Sv. Kajo, a proizvođač mu je CEMEX. Ovaj portlandski cement sadrži 65 – 79% klinkera i 21 – 35% visokokvalitetne zgure.

Karakteristike cementa su:

- visoka početna i konačna čvrstoća,
- povećanje čvrstoće pri većoj starosti betona (nakon 28 dana),
- smanjena tendencija skupljanja i nastanka pukotina,
- umjeren razvoj topline hidratacije,
- izvrsna svojstva ugrađivosti,

- svjetlija boja prikladnija za kombiniranje s pigmentima,
- povećana otpornost na agresivne medije zahvaljujući dodatku kvalitetne zgure.

Tablica 2.1 Tipična svojstva cementa CEM II/B-S 42,5 N [21]

TIPIČNA SVOJSTVA		ZAHTJEV NORME
% SO <sub>3</sub>	3,0 ± 0,2%	≤ 3,5
Kloridi	0,06+0,02%	≤ 0,10
Vrijeme vezivanja* (početak)	180 ± 30 min	≥ 60
Postojanost volumena (Le Chatelier)	1 mm	≤ 10
Rana čvrstoća** (2 dana)	24 MPa	≥ 10
Normirana čvrstoća** (28 dana)	52 MPa	≥ 42,5; ≤ 62,5;
TIPIČAN SASTAV		ZAHTJEV NORME
Klinker (K) + gips (G)	70-78%	65-79
Zgura	22-28%	21-35
Sporadni sastojci	0-5%	0-5

\*pri temperaturi od 20°C

\*\*odstupanja u okviru std.devijacije ≤2

Preporuča se primjenjivati pri izradi betona za široku primjenu, radova u cestogradnji i cestovnim građevinama (kao što su tuneli, vijadukti, mostovi), pri izgradnji poslovnih, stambenih i industrijskih objekata. Također je pogodan za podzemne radove temeljenja i podloga te stabilizacije tla, izradu gotovih elemenata od betona, armiranog i prednapregnutog betona u normalnoj i termički tretiranoj proizvodnji. Uz to, ovaj cement koristi se i za izradu transportnog, pumpanog betona, industrijskih podova, estriha i betonskih kolnika te individualnih radova.

Ovaj cement pokazao se osobito prikladnim za izgradnju zahtjevnih inženjerskih konstrukcija i infrastrukturnih objekata od betona visokih marki, betona s visokim zahtjevima za trajnošću, za izradu vodonepropusnih betona te onih otpornih na mraz i soli za odmrzavanje te za armiranobetonske konstrukcije izložene djelovanju mora i/ili solima za odmrzavanje. [21]

### Preporuke za transport i skladištenje

- Transportirati u sredstvima koja štite cement od utjecaja vlage.
- Transportna sredstva prije punjenja cementom moraju biti očišćena od tvari koje mogu utjecati na kvalitetu cementa.
- Skladištiti u betonskim ili čeličnim silosima koji štite cement od vanjskih utjecaja, posebice od utjecaja vlage.
- Pri skladištenju u silos osigurati da ne dolazi do miješanja cementa s drugim proizvodima.
- Uz pravilan transport i skladištenje, cement je potrebno upotrijebiti najkasnije 6 mjeseci nakon isporuke.

Tablica 2.2 Prikazane su bitne značajke i svojstva ovog portland cementa [21]

Bitna značajka	Svojstvo	Harmonizirana tehnička specifikacija
Oznaka i sastav	CEM II/B-S	EN 197-1:2011
Tlačna čvrstoća (rana i normirana)	42.5 N	
Vrijeme vezivanja	zadovoljava	
Postojanost volumena: - Le Chatelier - udjel SO <sub>3</sub>	zadovoljava zadovoljava	
Udjel klorida	zadovoljava	
Netopljivi ostatak	zadovoljava	
Gubitak žarenjem	zadovoljava	

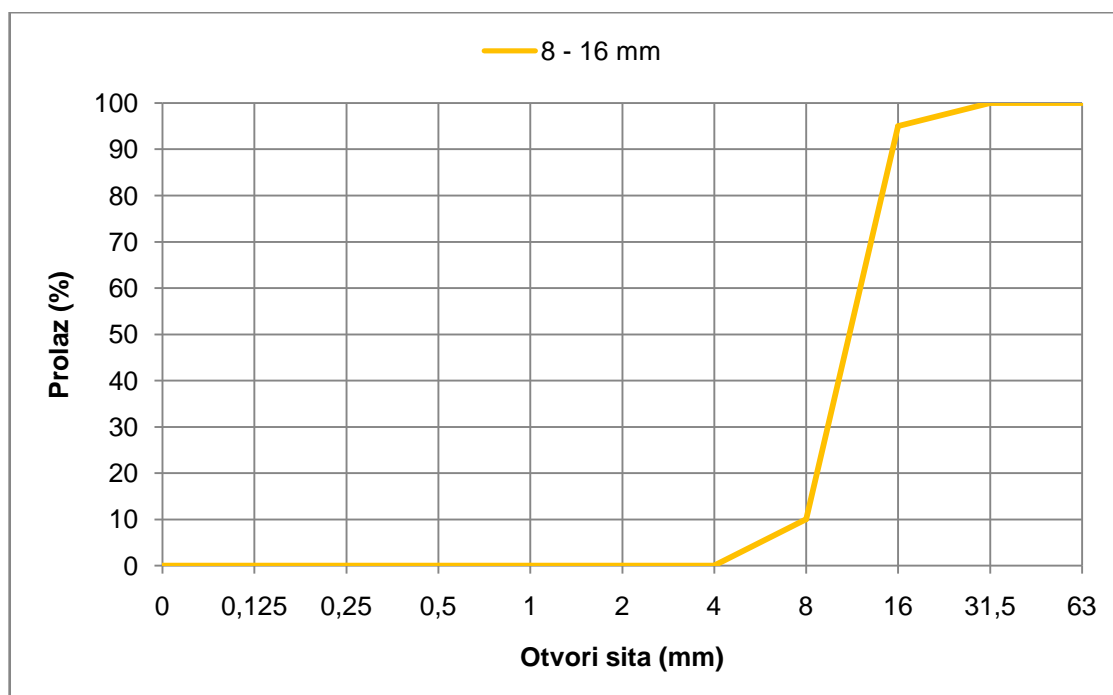
#### 4.1.2 Agregat

Krupniji agregat daje hidrološke prednosti zbog velikih pora i propusnosti. Dodavanje sitnog agregata može povećati tlačnu čvrstoću i gustoću, ali zato smanjuje brzinu protoka vode kroz masu propusnog betona. Najveće preporučene veličine čestica su oko 9,5 – 19 mm, što je dovoljno veliko kako bismo dobili otvorene pore i brzo prodiranje vode. [22]

Prilikom izrade mješavina poroznog betona u ovom diplomskom radu, korišten je drobljeni agregat frakcije 8 – 16 mm.



*Slika 4.1 Prirodni agregat frakcije 8 – 16 mm*



*Slika 4.2 Granulometrijska krivulja agregata 8 – 16 mm*

#### **4.1.3 Voda**

Pri izradi mješavina poroznog betona korištena je pitka voda iz vodovoda te nisu potrebna dodatna ispitivanja kvalitete.

#### **4.1.4 Silicijska prašina**

Silicijska prašina je prema postanku industrijski mineralni dodatak, a prema svojstvu (aktivno sudjeluje u procesu hidratacije cementa) spada u pucolane (silikatni i aluminosilikatni materijali koji nemaju latentna svojstva, kemijski reagiraju s vodom). Silicijska prašina je najkvalitetniji pucolan s najvećom pucolanskom aktivnošću. Sastoji se od vrlo finih čestica nastalih kao sporedni proizvod pri proizvodnji silicijskih i ferosilicijskih legura. Fizikalni zahtjevi su: specifična ploština, sadržaj suhe tvari u mulju, indeks aktivnosti. Naziva se još i silikatna prašina ili mikrosilika. Veličine čestica silicijske prašine kreću se od 0,01 - 0,3  $\mu\text{m}$ .

Silicijska prašina na svojstva betona ima učinak preko dva mehanizma:

- pucolanske reakcije,
- učinka sitnih čestica.

Sitne čestice doprinose poboljšanju obradljivosti i povećanju kohezivnosti i zapunjavaju unutrašnju strukturu jer su znatno sitnije od čestica cementa. Silicijska prašina je učinkovita i za eliminiranje izdvajanja vode (poboljšava otpornost na segregaciju). [23]





*Slika 4.3 Silicijska prašina koja se koristila pri izradi poroznih mješavina*

#### **4.1.5 Leteći pepeo**

Leteći pepeo je prema postanku industrijski mineralni dodatak, a prema svojstvu spada u pucolane jer aktivno sudjeluje u procesu hidratacije cementa. Leteći pepeo nastaje kao sporedni proizvod u modernim termoelektranama koje imaju pogon na ugljen i koji mora prethodno biti samljeven. Dakle, leteći pepeo je fini prah koji se uglavnom sastoji od čestica sferičnog oblika, dobiven izgaranjem ugljene prašine, uz eventualno sporedne materijale za izgaranje. [24]

Leteći pepeo poboljšava svojstva betona na dva načina:

- fizikalnim efektom povezanog s povišenjem udjela finih čestica- čestice letećih pepela manje su nego čestice cementa,
- pucolanskim i/ili hidrauličkim reakcijama.

Leteći pepeo smanjuje potrebu za vodom i izdvajanje vode, poboljšava obradljivost, poboljšava nepropusnost, usporava oslobađanje topline hidratacije.[24]



*Slika 4.4 Leteći pepeo koji se koristio za izradu poroznih mješavina*

## **4.2 Izrada mješavina poroznog betona**

U laboratoriju Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, izrađeno je 8 mješavina poroznog betona koje se međusobno razlikuju sadržajem komponenti i načinom ugrađivanja. U prve 4 mješavine dodana je silicijska prašina u rasponu od 10-30% te su uzorci ugrađivani u 3 sloja zbijanjem drvenom letvom.

U druge 4 mješavine dodan je leteći pepeo u rasponu od 10 – 30%, a uzorci su ugrađeni vibriranjem na vibrostolu. Ukupna količina veziva za 6 mješavina iznosi  $350 \text{ kg/m}^3$ , a samo u dvije mješavine je  $400 \text{ kg/m}^3$ . Polazna receptura je mješavina dobivena u okviru diplomskog rada [26] koja je imala odličnu propusnost, ali ne i čvrstoću. Cilj je utvrditi kako će dodaci utjecati na propusnost i čvrstoću.

U tablici 2.3 prikazana je receptura za mješavinu P<sub>1</sub>, napravljenu uz dodatak silicijske prašine i ugrađenu zbijanjem drvenom letvom.

Tablica 2.3 Receptura za mješavinu P<sub>1</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOĆA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		315	3,01	104,65	6,30
VODA		122,5	1,00	122,5	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
SILIKA	10,00	35,00	2,30	15,22	0,70
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1473,1	2,69	547,63	29,46
UKUPNO		1946		1000	38,91

Tablica 2.4 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 - 16	1	14,73129	1,00	0,15	1,00	0,15	14,73	0,29
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		35,00					35,00	0,70
CEMENT		315					315	6,30
VODA		123		0,15		0,1	123	2,45

U tablici 2.5 prikazana je receptura za mješavinu P<sub>2</sub>, napravljenu uz dodatak silicijske prašine i ugrađenu zbijanjem drvenom letvom.

Tablica 2.5 Receptura za mješavinu  $P_2$ 

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOĆA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		280	3,01	93,02	5,60
VODA		122,5	1,00	122,5	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
SILIKA	20,00	70,00	2,30	30,43	1,40
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1463,5	2,69	544,04	29,27
UKUPNO		1936		1000	38,72

Tablica 2.6 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU			VLAŽNOST	1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 - 16	1	14,63473	1,00	0,15	1,00	0,15	14,63	0,29
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		70,00					70,00	1,40
CEMENT		280					280	5,60
VODA		123		0,15		0,1	123	2,45

U tablici 2.7 prikazana je receptura za mješavinu P<sub>3</sub>, napravljenu uz dodatak silicijske prašine i ugrađenu zbijanjem drvenom letvom.

Tablica 2.7 Receptura za mješavinu P<sub>3</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOĆA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		245	3,01	81,40	4,90
VODA		122,5	1,00	122,5	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
SILIKA	30,00	105,00	2,30	45,65	2,10
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1453,8	2,69	540,45	29,08
UKUPNO		1926		1000	38,53

Tablica 2.8 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 - 16	1	14,53817	1,00	0,15	1,00	0,15	14,54	0,29
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		105,00					105,00	2,10
CEMENT		245					245	4,90
VODA		123		0,15		0,1	123	2,45

U tablici 2.9 prikazana je receptura za mješavinu P<sub>4</sub>, napravljenu uz dodatak silicijske prašine i ugrađenu zbijanjem drvenom letvom.

Tablica 2.9 Receptura za mješavinu P<sub>4</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOĆA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		350	3,01	116,28	7,00
VODA		140,0	1,00	140,0	2,80
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
SILIKA	14,28	50	2,30	21,73	1,00
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1377,3	2,69	511,99	27,55
UKUPNO		1917		1000	38,34

Tablica 2.10 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU			VLAŽNOST	1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 - 16	1	13,77254	1,00	0,14	1,00	0,14	13,77	0,28
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		49,98					49,98	1,00
CEMENT		350					350	7,00
VODA		140		0,14		0,1	140	2,80

U tablici 2.11 prikazana je receptura za mješavinu P<sub>5</sub>, napravljenu uz dodatak letećeg pepela i ugrađenu vibriranjem na vibrostolu.

Tablica 2.11 Receptura za mješavinu P<sub>5</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOĆA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		315	3,01	104,65	6,30
VODA		122,5	1,00	122,5	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
LETEĆI PEPEC	10,00	35,00	2,25	15,56	0,70
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1472,2	2,69	547,29	29,44
UKUPNO		1945		1000	38,89

Tablica 2.12 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 - 16	1	14,72219	1,00	0,15	1,00	0,15	14,72	0,29
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		35,00					35,00	0,70
CEMENT		315					315	6,30
VODA		123		0,15		0,1	123	2,45



U tablici 2.13 prikazana je receptura za mješavinu P<sub>6</sub>, napravljenu uz dodatak letećeg pepela i ugrađenu vibriranjem na vibrostolu.

Tablica 2.13 Receptura za mješavinu P<sub>6</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOĆA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		280	3,01	93,02	5,60
VODA		122,5	1,00	122,5	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
LETEĆI PEPEC	20,00	70,00	2,25	31,11	1,40
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1461,7	2,69	543,37	29,23
UKUPNO		1934		1000	38,68

Tablica 2.14 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU			VLAŽNOST	1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 - 16	1	14,61654	1,00	0,15	1,00	0,15	14,62	0,29
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		70,00					70,00	1,40
CEMENT		280					280	5,60
VODA		123		0,15		0,1	123	2,45



U tablici 2.15 prikazana je receptura za mješavinu P<sub>7</sub>, napravljenu uz dodatak letećeg pepela i ugrađenu vibriranjem na vibrostolu.

Tablica 2.15 Receptura za mješavinu P<sub>7</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOĆA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	ZA 1	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		245	3,01	81,40		4,90
VODA		122,5	1,00	122,5		2,45
V/C	0,35					
DODACI BETONU						
LETEĆI PEPEO	30,00	105,00	2,25	46,67		2,10
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210		0
AGREGAT		1451,1	2,69	539,44		29,02
UKUPNO		1924		1000		38,47

Tablica 2.16 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 - 16	1	14,51088	1,00	0,15	1,00	0,15	14,51	0,29
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		105,00					105,00	2,10
CEMENT		245					245	4,90
VODA		123		0,15		0,1	123	2,45

U tablici 2.17 prikazana je receptura za mješavinu  $P_8$ , napravljenu uz dodatak letećeg pepela i ugrađenu vibriranjem na vibrostolu.

Tablica 2.17 Receptura za mješavinu  $P_8$

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup>	GUSTOĆA r	VOLUMEN m <sup>3</sup>	ZA 1	MASA ZA 20 lit.
		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]		[kg]
CEMENT		350	3,01	116,28		7,35
VODA		140,0	1,00	140,0		2,94
V/C	0,35					
DODACI BETONU						
LETEĆI PEPEO	15,00	50,00	2,25	22,22		1,05
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210		0
AGREGAT		1375,9	2,69	511,50		28,89
UKUPNO		1916		1000		40,23

Tablica 2.18 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU			VLAŽNOST	1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8 - 16	1	13,75932	1,00	0,14	1,00	0,14	13,76	0,28
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		50,00					50,00	1,05
CEMENT		350					350	7,35
VODA		140		0,14		0,1	140	2,94

### 4.3 Ugradnja mješavina u kalupe

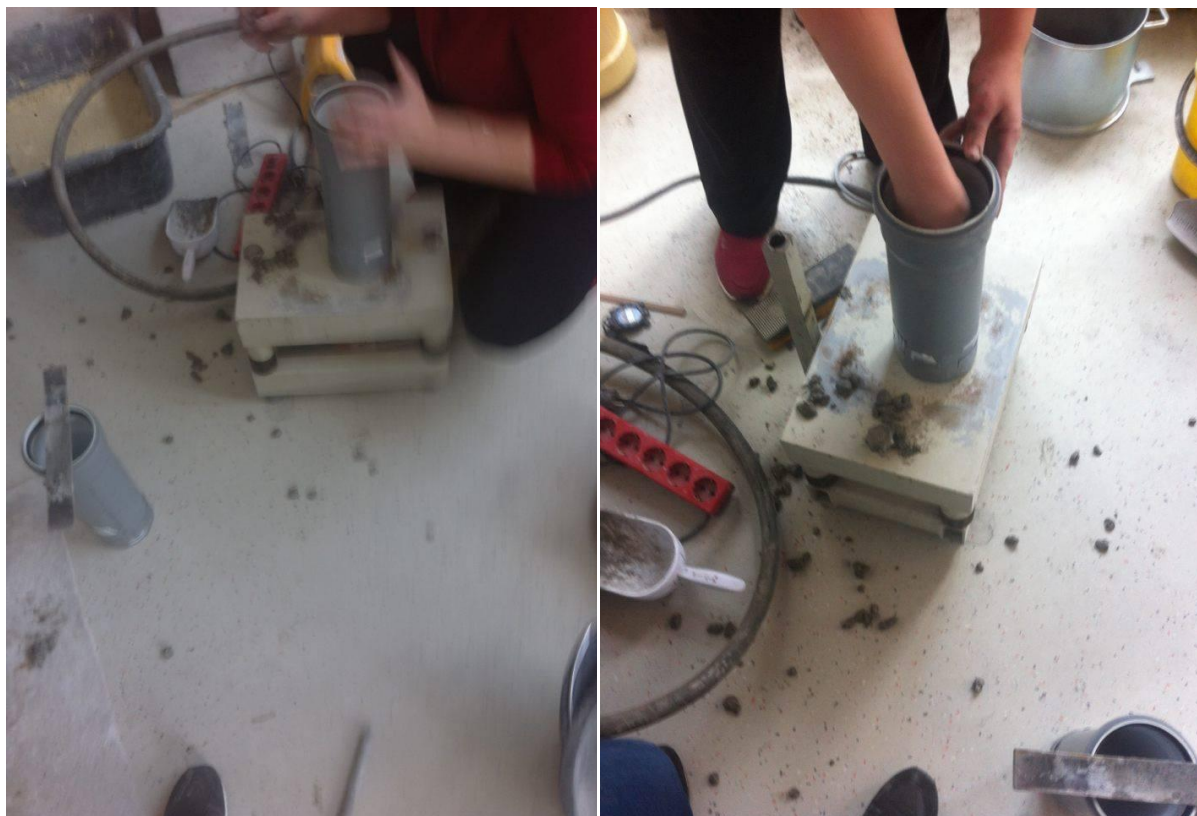
Izrađene mješavine poroznog betona ugrađuju se u kalupe oblika kocke i valjka. Svaku mješavinu ugrađujemo u 3 kalupa oblika kocke i u 2 kalupa oblika valjka.

Prve 4 mješavine ugrađene su zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom, na način da su se mješavine zbijale u 3 sloja s 25 udaraca, a letva i valjak su položeni na svježi beton te su se udarali čekićem. Betonski valjak je odabran zato što oblikom omogućuje i ugradnju betona u kalupe oblika valjka. Navedeni način ugradnje može se vidjeti na slici 4.5.



*Slika 4.5 Ugradnja mješavina drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom*

Iduće 4 mješavine ugrađene su vibriranjem na vibrostolu na način da se svježi beton ugrađivao u 3 sloja, a svaki sloj je vibriran po 3,75 sekundi, na temelju iskustva prethodnih diplomskih radova. Navedeni prikaz ugrađivanja betona prikazan je na slici 4.6.



*Slika 4.6 Ugradnja mješavina vibriranjem na vibrostolu*

#### **4.4 Metode ispitivanja poroznog betona**

Na uzorcima poroznog betona vršila su se ispitivanja u svrhu određivanja svojstava poroznog betona. Mješavine su ispitane u svježem i u očvrsлом stanju.

U svježem stanju ispitivana je konzistencija betona, dok je u očvrsлом stanju ispitana poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća cijepanjem.

##### **4.4.1 Ispitivanje konzistencije**

U svježem stanju ispitivana je konzistencija betona metodom oblikovanja kuglice. Određena količina svježeg betona se zahvatila rukom te se od nje formirala kuglica. Ukoliko je kuglica zadržavala svoj oblik prilikom oblikovanja i nije dolazilo do odvajanja

cementnog mlijeka i zrna, mješavina je imala zadovoljavajuću konzistenciju. U skladu s tim, u nekim mješavinama poroznog betona bilo je potrebno dodati veću količinu vode od proračunate, a u nekim je trebalo dodati manje.

Drugi način ispitivanja konzistencije svježeg betona je ispitivanje slijeganja. Svježi beton se zbija u limenom kalupu oblika šupljeg krnjeg stošca, koji se postavlja čvrstu, horizontalnu podlogu širim krajem prema dolje. Beton se zbija u 3 sloja s po 25 udaraca šipkom. Nakon zbijanja posljednjeg sloja, kalup se ukloni podizanjem prema gore i zatim se mjeri slijeganje.



*Slika 4.7 Ispitivanje konzistencije metodom oblikovanja kuglice i metodom slijeganja*

#### **4.4.2 Ispitivanje poroznosti**

Poroznost mješavina betona ispitivana je na uzorcima oblika kocke. Najprije se izračunao volumen uzorka  $V$ , a potom je uzorak stavljen u vodu i izmjerena mu je masa  $M_1$ . Nakon vađenja iz vode, uzorak se sušio 24 sata na temperaturi od  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  do stalne mase i izmjerena je masa suhog uzorka  $M_2$ .





*Slika 4.8 Sušenje uzoraka u pećnici*

Poroznost uzorka računa se po formuli:

$$P = 1 - \left( \frac{M_1 - M_2}{\rho V} \right) \cdot 100 (\%),$$

gdje je:

P – ukupna poroznost betona (%),

$M_1$  - masa uzorka na zraku (kg),

$M_2$  – masa uzorka potopljenog u vodi (kg),

$\rho$  – gustoća vode ( $\text{kg/m}^3$ ),

V – volumen uzorka ( $\text{mm}^3$ ).

#### **4.4.3 Ispitivanje propusnosti**

Propusnost mješavina poroznog betona ispitana je na uzorcima oblika valjka promjera 100 mm i visine 200 mm. Uzorci moraju biti držani u vodi minimalno 7 dana kako bi bili potpuno zasićeni te kako bi voda mogla slobodno teći u porama, bez otpora zraka.

Propusnost poroznog betona ispitana je pomoću dvije metode:

- metoda padajuće razine stupca vode,
- metoda stalne razine stupca vode.

#### 4.4.4 Metoda padajuće razine stupca vode

Ova metoda služi za mjerenje koeficijenta propusnosti kod slabo poroznih materijala. Potreba za njenim korištenjem javila se zbog problema mjerenja veoma malog protoka kod slabo poroznih materijala kod kojih je protok toliko mali da bi voda, koja je prošla kroz uzorak, više isparila, nego što bi se skupilo u posudi za mjerenje volumena vode koja je „izašla“ iz uzorka.

Kod ove metode, poznata je površina vertikalne cijevi i površina uzorka. U ovom slučaju, one su jednake. Ulijemo vodu u cijev do označene crtice te mjerimo vrijeme koje je potrebno da voda dođe s razine gornje vode,  $H_g$ , do razine donje vode,  $H_d$ .



*Slika 4.9 Ispitivanje propusnosti metodom padajuće razine stupca vode*

Potom se izračuna koeficijent propusnosti prema formuli:

$$k = \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{t} \cdot \log \frac{H_g}{H_d}$$

pri čemu je:

$k$  – koeficijent propusnosti (mm/s),

$L$  - visina uzorka (mm),

$t$  - vrijeme potrebno da razina vodnog stupca dođe s gornje do donje razine vode (s),

$H_g$  - gornja razina vode (mm),

$H_d$  - donja razina vode (mm). [29]

#### 4.4.5 Metoda stalne razine stupca vode

Metoda stalne razine stupca vode, odnosno metoda s konstantnim padom potencijala, služi za mjerenje koeficijenta propusnosti poroznih materijala. Kod ove metode uspostavlja se stacionarno strujanje vode kroz uzorak te se mjeri protok  $q$ , uz konstantnu razliku hidrauličkih potencijala.

Konstantna razlika potencijala je osigurana stalnim dolijevanjem vode na vrhu uzorka s obzirom da voda kroz njih brzo struji.



*Slika 4.10 Ispitivanje propusnosti metodom stalne razine stupca vode*



Mjerenjem volumena vode  $V$  koja je protekla u nekom vremenskom intervalu  $\Delta t$ , dobije se protok vode po izrazu:

$$q = \frac{V}{\Delta t}$$

U ovom slučaju, korišteni vremenski interval  $\Delta t$  je iznosio 30 s.

Primjenom Darcyevog zakona slijedi:

$$k = \frac{V \cdot L}{H_g \cdot A \cdot \Delta t}$$

pri čemu je:

$k$  – koeficijent propusnosti (mm/s),

$V$  – volumen uzorka (mm<sup>3</sup>),

$L$  – visina uzorka (mm),

$H_g$  – razina gornje vode (mm),

$A$  – površina poprečnog presjeka uzorka (mm<sup>2</sup>),

$\Delta t$  – vremenski interval u kojem se mjeri količina vode koja je istekla (s). [29]

#### 4.4.6 Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća betona ispitana je nakon 28 dana od dana izrade mješavina na 3 uzorka oblika kocke, dimenzija 150x150x150 cm. Kao mjerodavna veličina definira se srednja vrijednost. Najprije je izvršeno vaganje uzoraka i mjerenje dimenzija da bismo odredili gustoću, a potom je ispitana tlačna čvrstoća. Zatim je uzorak stavljen između čeličnih ploča hidrauličke preše, nakon čega se nanosi sila kontinuirano s konstantnim prirastom, sve do sloma ispitnog tijela.

Kod poroznih betona postupak brušenja površina preko kojih se prenosi opterećenje je vrlo bitan. Zbog veličine pora, veća je vjerojatnost da površina nije ravna i da se opterećenje ne prenosi preko cijele površine, već preko izbočenog zrna ili nekoliko zrna agregata. Uslijed pomaka zrna agregata, preša evidentira lom uzorka. Na taj način je moguće dobiti tlačnu čvrstoću poroznog betona, koja je manja od stvarne tlačne čvrstoće. [25]



*Slika 4.11 Ispitivanje tlačne čvrstoće hidrauličkom prešom*

Tlačna čvrstoća računa se prema izrazu:

$$f_c = \frac{F}{A}$$

pri čemu je:

$f_c$  – tlačna čvrstoća betona ( $\text{N/mm}^2$ ),

$F$  – maksimalno opterećenje pri lomu (N),

$A$  – površina ispitnog tijela ( $\text{mm}^2$ ).

#### 4.4.7 Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Vlačna čvrstoća mješavine poroznog betona ispitana je na uzorcima oblika valjka, nakon minimalno 28 dana od izrade mješavina. Uzorak oblika valjka stavljen je u prešu te je opterećen linijskim tlakom po dvjema suprotnim izvodnicama sve do sloma.



*Slika 4.12 Preša za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem*

Vlačna čvrstoća je izračunata prema sljedećem izrazu:

$$f_{ct} = \frac{2 F}{\pi \cdot d \cdot L}$$

pri čemu je:

$f_{ct}$  – vlačna čvrstoća uzorka ( $\text{N/mm}^2$ ),

$F$  – sila pri kojoj dolazi do sloma uzorka (N),

$L$  – duljina uzorka (mm),

$d$  – promjer uzorka (mm). [25]

#### 4.5 Izrada probnih porozno-betonskih ploča

U drugom dijelu eksperimentalnog rada potrebno je odrediti propusnost probnih ploča godinu dana nakon njihove ugradnje. Četiri probne ploče, napravljene u okviru diplomskog rada [26] su ugrađene na horizontalnu, prethodno pripremljenu:

- Zemljanu podlogu
- Travnatu podlogu
- Šljunčanu podlogu.

Slika 4.13 prikazuje zemljanu podlogu na koju su ugrađene dvije probne ploče različitih frakcija i jednakih količina cementa.



*Slika 4.13 Zemljana podloga [26]*

Na slici 4.14 prikazana je jedna probna ploča koja je ugrađena na travnatu podlogu da se ispita kako vegetacija utječe na propusnost poroznog betona.



*Slika 4.14 Travnata podloga [26]*



Na slici 4.15 prikazana je šljunčana podloga debljine 5 cm koja je postavljena na zemljanu podlogu.



*Slika 4.15 Šljunčana podloga [26]*

Beton se ugrađivao zbijanjem drvenom letvom i čekićem u 3 sloja. Prilikom ugradnje svakog sloja, beton je jednoliko raspoređen i zbijen unutar oplata kao što prikazuje sljedeća slika. [26]



*Slika 4.16 Proces ugradnje porozno – betonskih ploča [26]*



*Slika 4.17 Izgled ploča nakon godinu dana*

Na slici 4.17 može se vidjeti izgled ploče godinu dana nakon izrade.

#### 4.5.1 Ispitivanje brzine infiltracije probnih ploča prema ASTM C 1701

Brzina infiltracije probnih ploča ispitana je godinu dana nakon izrade ploča. Najprije su horizontalne površine probnih ploča očišćene metlom kako bi se maknuo površinski sloj nečistoće te pore učinile prohodnima.

Čelični prsten, unutarnjeg promjera 30,48 cm (12 in), postavljen je na središte ploče te je brtvljen glinamolom, što prikazuje slika 4.19.

Prije početka ispitivanja, na unutrašnjoj stijenci prstena, označene su dvije horizontalne linije koje su udaljene od dna 1, odnosno 1,5 cm. [26]



*Slika 4.18 Čelični prsten postavljen na porozno – betonsku ploču*



Pri probnom ispitivanju, u sredinu prstena izlijeva se 3,6 litara vode te se pritom pazi da vodno lice bude između dvije označene linije. Mjeri se vrijeme od prvog kontakta vode i betona do trenutka kada beton upije svu vodu, odnosno kada na površini više nema vidljive vode. Ukoliko je proteklo vrijeme kraće od 30 sekundi, u stvarnom ispitivanju koristi se 18 litara vode, a ukoliko je vrijeme dulje od 30 sekundi, koristi se 3,6 litara.

U ovom ispitivanju, sve četiri probne ploče su propustile vodu u trajanju manjem od 30 sekundi, stoga je u stvarnom ispitivanju korištena količina vode od 18 litara.

Potom se vrši stvarno ispitivanje, u ovom slučaju s 18 litara vode, i mjeri se vrijeme na isti način kao kod probnog ispitivanja, što prikazuje slika 4.19.



*Slika 4.19 Mjerenje brzine infiltracije [26]*

Brzina infiltracije određuje se pomoću izraza:

$$I = \frac{K \cdot M}{D^2 \cdot t}$$

pri čemu je:

*I*- brzina infiltracije (mm/h),

$M$ - masa infiltrirane vode (kg),

$K$ - konstanta iznosa 4583666000,

$D$ - unutarnji promjer infiltracijskog prstena (mm),

$t$ - vrijeme potrebno da izmjerena količina vode prođe kroz beton. [26]



## 5 REZULTATI I ANALIZE REZULTATA ISPITIVANJA

Ispitivanja poroznog betona uz mineralni dodatak provedena su u laboratorijskim uvjetima, u svježem i u očvrslom stanju. U svježem stanju ispitivana je konzistencija betona pomoću dvije metode, metode slijeganja i metode oblikovanja kuglice.

U očvrslom stanju provedena su ispitivanja propusnosti i poroznosti te tlačne i vlačne čvrstoće. Rezultati ispitivanja prikazani su u nastavku.

### 5.1 Rezultati ispitivanja konzistencije betona

Metoda slijeganja koristi se kod ispitivanja konzistencije kod klasičnih betona, dok se metoda oblikovanja kuglice koristi kod ispitivanja poroznog betona.

Na slici 5.1 prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine  $P_1$ . Ova mješavina sadrži 10% silike. Bilo je potrebno dodati još vode pa vodovezivnifaktor ove mješavine iznosi 0,37 te je moguće oblikovati kuglicu bez odvajanja zrna. Nema slijeganja.



*Slika 5.1 Ispitivanje konzistencije mješavine  $P_1$*

Na slici 5.2 prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine  $P_2$  s dodatkom silike u iznosu od 20%. Vodovezivni faktor iznosi 0,35 te se konzistencija smatra zadovoljavajućom. Također je moguće oblikovati kuglicu, a slijeganje iznosi 0.



*Slika 5.2 Ispitivanje konzistencije mješavine  $P_2$ .*

Na slici 5.3 prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine  $P_3$  koja sadrži 30% silike. Bilo je potrebno dodati još vode da bi se mogla oblikovati kuglica pa vodovezivni faktor iznosi 0,41. Nakon dodavanja vode, nije uočeno odvajanje zrna, kao ni izdvajanje cementnog mlijeka te se konzistencija mješavine smatra zadovoljavajućom. Nema slijeganja.



*Slika 5.3 Ispitivanje konzistencije mješavine  $P_3$*

Ispitivanje konzistencije mješavine  $P_4$  prikazano je na slici 5.4. Ova mješavina sadrži 14,28% silike. Vodovezivni faktor ove mješavine iznosi 0,35 i moguće je oblikovati kuglicu, a slijeganje je 0.



*Slika 5.4 Ispitivanje konzistencije mješavine  $P_4$*



Slika 5.5 prikazuje mješavinu  $P_5$  koja sadrži 10% letećeg pepela te čiji vodovezivni faktor iznosi 0,35. Kod ove mješavine, teško se oblikuje kuglica jer dolazi do razdvajanja zrna pa je bilo potrebno dodati 10% više cementa, agregata i silike. Na kraju vodovezivni faktor iznosi 0,32 i moguće je oblikovati kuglicu kao što prikazuje slika 5.6. Nema slijeganja.



*Slika 5.5 Ispitivanje konzistencije mješavine  $P_5$  i nemogućnost oblikovanja kuglice*



*Slika 5.6 Ispitivanje konzistencije mješavine  $P_5$  uz korekciju*

Na slici 5.7 prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine  $P_6$  s dodatkom letećeg pepela u iznosu od 20%, čiji vodovezivni faktor iznosi 0,35. Ne dolazi do izdvajanja cementnog

mlijeka i zrna pa se kuglica lako oblikuje rukama i konzistencija je zadovoljavajuća, a slijeganje iznosi 0.



*Slika 5.7 Ispitivanje konzistencije mješavine  $P_6$*

Slika 5.8 prikazuje ispitivanje konzistencije mješavine  $P_7$ . Ova mješavina sadrži 30% letećeg pepela. Bilo je potrebno smanjiti količinu vode da bi se mogla oblikovati kuglica pa vodovezivni faktor ove mješavine iznosi 0,34. Također, moguće je primijetiti da nema slijeganja.



*Slika 5.8 Ispitivanje konzistencije mješavine  $P_7$ .*

Na slici 5.9 prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine  $P_8$  s dodatkom letećeg pepela od 15%. Bilo je potrebno smanjiti količinu vode da bi se mogla oblikovati kuglica pa vodovezivni faktor iznosi 0,33. Nema slijeganja.



*Slika 5.9 Ispitivanje konzistencije mješavine  $P_8$ .*

## 5.2 Rezultati ispitivanja svojstava poroznog betona u očvrsлом stanju

U očvrsлом stanju ispitivani su:

- Poroznost
- Propusnost
- Tlačna čvrstoća
- Vlačna čvrstoća cijepanjem
- Brzina infiltracije ploča nakon 365 dana.

U ovom radu ispitana su svojstva 8 mješavina poroznog betona s dodatkom i uspoređena su sa svojstvima dviju mješavina poroznog betona bez dodataka, napravljenih za potrebe diplomskog rada [26].

### 5.2.1 Ispitivanje poroznosti

Tablica 3.1 prikazuje rezultate ispitivanja poroznosti betonskih mješavina prema metodi opisanoj u poglavlju 4.4.2.

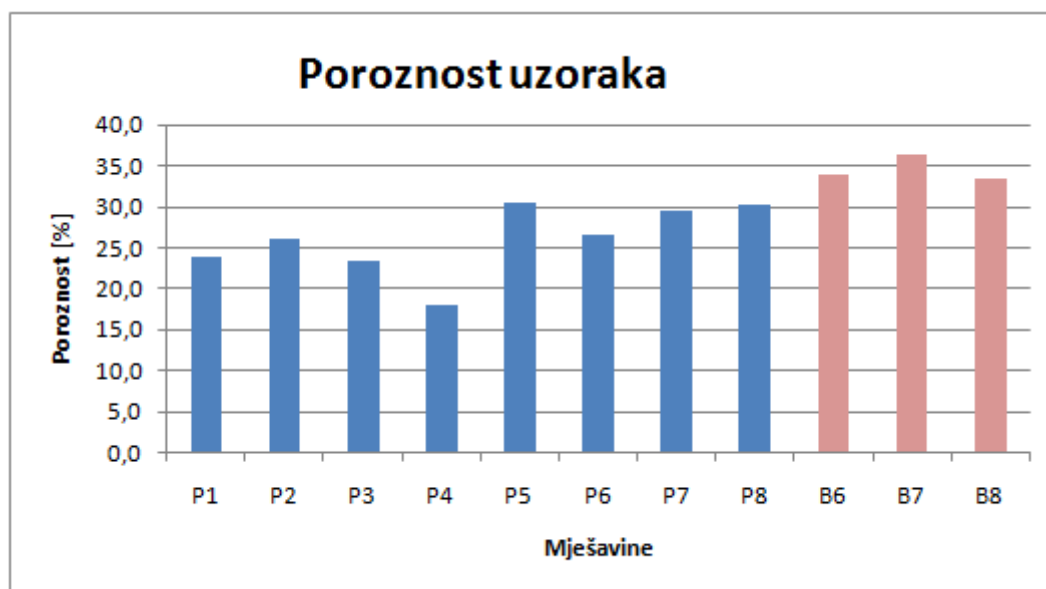
Poroznost ovakvih betona kreće se u rasponu od 11% do 35% [27] i uočavamo da sve mješavine zadovoljavaju taj kriterij.

Mješavina  $P_5$  ima najveću poroznost od mješavina koje su napravljene uz dodatak i najmanji vodovezivni faktor 0.32. Sadrži 10% letećeg pepela. Izrađena je vibriranjem na vibrostolu. Mješavine  $P_1 - P_4$  izrađene su uz dodatak silike te su zbijane drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom. Pokazuju manju poroznost u odnosu na mješavine  $P_5 - P_8$  koje su izrađene uz dodatak letećeg pepela te su zbijane vibriranjem na vibrostolu. Iz tog razloga, one su poroznije. Mješavina  $P_4$  je najmanje porozna i ima najveću gustoću, što se vidi iz tablice 3.1.

Tablica 3.1 Rezultati ispitivanja poroznosti

Oznaka	a	b	c	Volumen	Masa pod vodom	Masa na zraku	Poroznost	Gustoća
-	mm	mm	mm	mm <sup>3</sup>	g	g	%	kg/m <sup>3</sup>
P <sub>1</sub>	150	150	151,0	3397500	4042,0	6632,0	23,8	1952,02
P <sub>2</sub>	150	150	150,0	3375000	3967,0	6464,0	26,0	1915,26
P <sub>3</sub>	150	151	150,0	3397500	4009,0	6617,0	23,2	1947,61
P <sub>4</sub>	150	150	150,0	3375000	4216,0	6985,0	18,0	2069,63
P <sub>5</sub>	150	151	150,0	3397500	3861,0	6224,0	30,4	1831,94
P <sub>6</sub>	150	152	150,0	3420000	3913,0	6427,0	26,5	1879,24
P <sub>7</sub>	150	151	149,0	3374850	3805,0	6188,0	29,4	1833,56
P <sub>8</sub>	150	151	151,0	3420150	3883,0	6271,0	30,2	1833,55
B <sub>6</sub>	150	150	151,5	3408750	3827,1	6077,1	34,0	1782,79
B <sub>7</sub>	150	150	151,5	3408750	3675,4	5843,9	36,4	1714,38
B <sub>8</sub>	150	150	154,0	3465000	3830,0	6141,0	33,3	1772,29

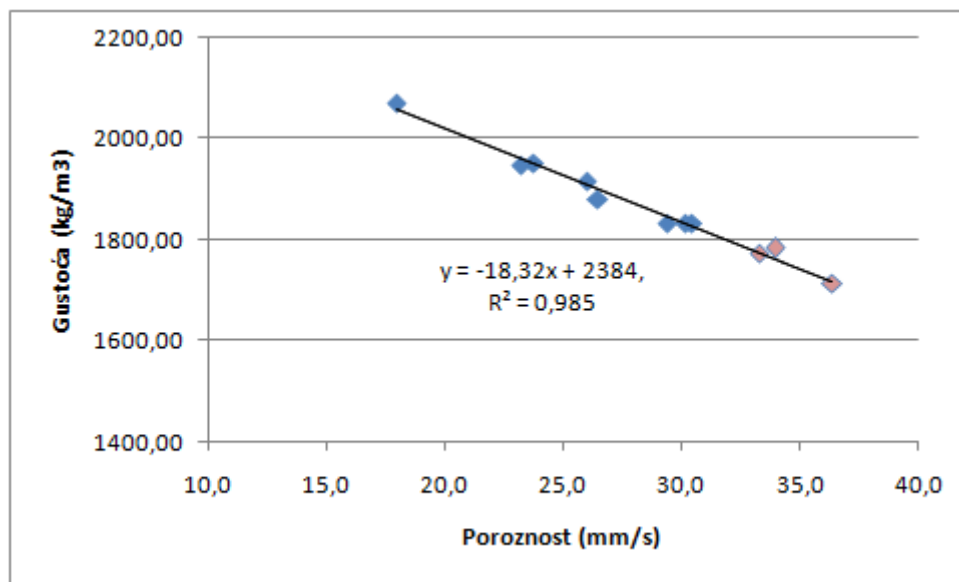
Ako se usporede mješavine P<sub>5</sub> i B<sub>6</sub>, koja je napravljena od drobljenog agregata frakcije 11,2 – 16 mm te ugrađena zbijanjem drvenom letvom, bez dodataka, uočava se da je veća poroznost te mješavine nego P<sub>5</sub>. Poroznost polazne mješavine B<sub>7</sub> iznosila je 36,4 % i niti jedna mješavina ove serije ispitivanja nije premašila tu vrijednost. Najbližu poroznost postigle su mješavine P<sub>5</sub> i P<sub>8</sub>.



Slika 5.10 Prikaz rezultata ispitivanja poroznosti



Slika 5.11 prikazuje linearnu ovisnost gustoće i poroznosti betonskih mješavina. Koeficijent korelacije iznosi 0,992, a korelacija je negativna. Njihov odnos je obrnuto proporcionalan, povećanjem jedne vrijednosti, smanjuje se druga i obratno.



*Slika 5.11 Prikaz ovisnosti između gustoće i poroznost*

Na slikama od 5.12 do 5.19 prikazani su presjeci uzoraka svih mješavina koji su dobiveni cijepanjem valjka po izvodnici. Vidljiva je količina i raspored šupljina prisutnih u uzorcima. Uzorci s manjom poroznošću imaju šupljine koje su zapunjene cementnom pastom, dok se to ne uočava kod uzoraka s visokom poroznošću.

Na slici 5.12 vidi se mješavina P<sub>1</sub> čiji sadržaj šupljina iznosi 23,8% te je ugrađena zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom. Ova mješavina sadrži 10% silike.



*Slika 5.12 Mješavina  $P_1$*

Slika 5.13 prikazuje mješavinu  $P_2$  čija poroznost iznosi 26% te je najveća od onih mješavina koje sadrže siliku i koje su ugrađene zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom.



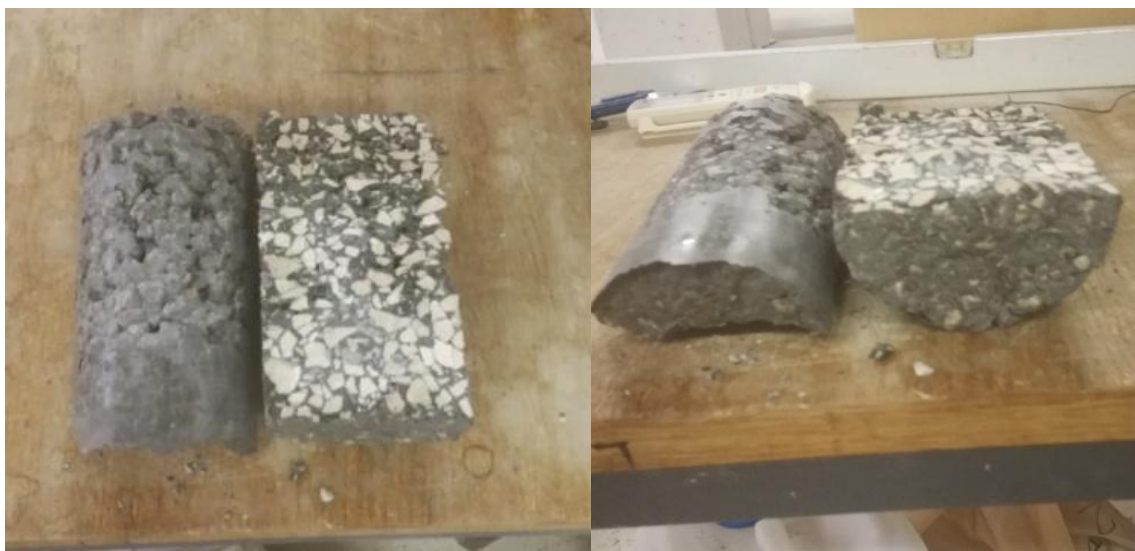
*Slika 5.13 Mješavina  $P_2$*

Na slici 5.14 prikazana je mješavina  $P_3$ , s dodatkom letećeg pepela od 30%, koja ima sadržaj šupljina 23,2 %.



*Slika 5.14 Mješavina  $P_3$*

Slika 5.15 prikazuje mješavinu  $P_4$  koja ima najmanju poroznost i najveću gustoću. Sadrži 14,28% silike, a sadržaj šupljina iznosi 18% te je mješavina ugrađena zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom.



*Slika 5.15 Mješavina  $P_4$*

Mješavina  $P_5$ , prikazana na slici 5.16, ima najveću poroznost u iznosu od 30,4% te najmanju gustoću. Ugrađena je vibriranjem na vibrostolu te sadrži 10% letećeg pepela.



*Slika 5.16 Mješavina  $P_5$*

Na slici 5.17 prikazana je mješavina  $P_6$  koja ima sadržaj šupljina u iznosu od 26,5%, a ugrađena je vibriranjem na vibrostolu. Ova mješavina sadrži 20% letećeg pepela.



*Slika 5.17 Mješavina P<sub>6</sub>*

Na slici 5.18 prikazana je mješavina P<sub>7</sub> koja ima treću najveću poroznost u iznosu od 29,4%. Ova mješavina sadrži 30% letećeg pepela.



*Slika 5.18 Mješavina P<sub>7</sub>*



Na slici 5.19 prikazana je mješavina  $P_8$  koja, nakon mješavine  $P_5$ , ima najveću poroznost u iznosu od 30,2 %. Ugrađena je vibriranjem na vibrostolu, a sadržaj letećeg pepela ove mješavine iznosi 15%.



*Slika 5.19 Mješavina  $P_8$*

### **5.2.2 Rezultati ispitivanja propusnosti**

Propusnost uzoraka betonskih mješavina ispitana je pomoću dvije metode, metode padajuće razine stupca vode i metode stalne razine stupca vode, kao što je prikazano u poglavlju 4.4.3.

U tablici 3.2 prikazani su rezultati ispitivanja, pri čemu vrijednost  $k_1$  predstavlja koeficijent propusnosti prema metodi padajuće razine stupca vode, a vrijednost  $k_2$  predstavlja vrijednost propusnosti prema metodi stalne razine stupca vode.

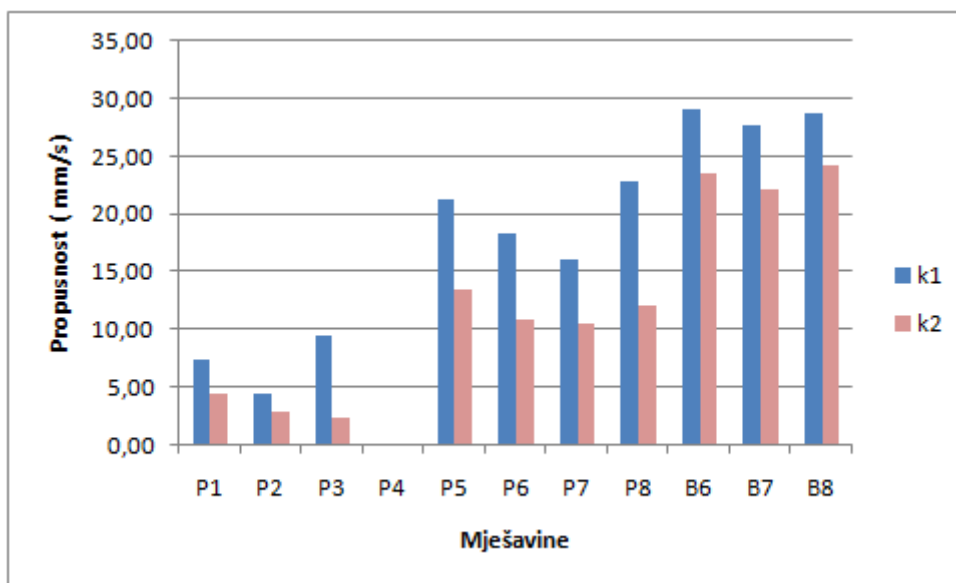
Tablica 3.2 Prikaz rezultata ispitivanja propusnosti

Oznaka	Uzorak			Metoda padajuće razine				Metoda stalne razine		
	Promjer	Visina	Površina	H <sub>g</sub>	H <sub>d</sub>	Vrijeme	k <sub>1</sub>	Volumen	Vrijeme	k <sub>2</sub>
-	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm	mm	s	mm/s	mm <sup>3</sup>	s	mm/s
P <sub>1</sub>	116	201,00	10568,3	280	80	34,37	7,32	1919000	30	4,34
P <sub>2</sub>	116	209,00	10568,3	280	80	59	4,43	1169000	30	2,75
P <sub>3</sub>	116	202,00	10568,3	280	80	26,91	9,39	1001000	30	2,28
P <sub>4</sub>	116	210,00	10568,3	0	0	0	0,00	0	30	0,00
P <sub>5</sub>	116	205,00	10568,3	295	95	10,94	21,21	6153000	30	13,49
P <sub>6</sub>	116	200,00	10568,3	275	75	14,23	18,24	4681100	30	10,74
P <sub>7</sub>	116	215,00	10568,3	280	80	16,72	16,09	4317000	30	10,46
P <sub>8</sub>	116	208,00	10568,3	280	80	11,44	22,75	5141000	30	12,05
B <sub>6</sub>	103	203,00	8332,3	280	80	8,76	29,00	8115000	30	23,54
B <sub>7</sub>	103	200,00	8332,3	280	80	9,03	27,72	7768000	30	22,20
B <sub>8</sub>	103	204,00	8332,3	300	100	7,80	28,70	8867000	30	24,12

Vrijednosti koeficijenta propusnosti, prema metodi padajuće razine stupca vode, kreće se u rasponu od 0 do 22,75 mm/s. Vrijednosti koeficijenta propusnosti, prema metodi stalne razine stupca vode, kreće se u rasponu od 0 do 13,49 mm/s.

Najveću propusnost po obje metode pokazuju mješavine B<sub>6</sub> i B<sub>8</sub>, a onda slijedi B<sub>7</sub>. Najveću propusnost od mješavina napravljenih uz mineralni dodatak, po metodi padajuće razine stupca vode, ima mješavina P<sub>8</sub> koja je napravljena uz dodatak od 15% letećeg pepela te ugrađena vibriranjem na vibrostolu. Najveću propusnost od mješavina napravljenih uz mineralni dodatak, po metodi stalne razine stupca vode, ima mješavina P<sub>5</sub> koja je ugrađena vibriranjem na vibrostolu te ima najmanji vodovezivni faktor. Ova mješavina sadrži 10% letećeg pepela. I u ovom ispitivanju su najbolje mješavine P<sub>5</sub> i P<sub>8</sub>, što je logično s obzirom da velika poroznost omogućava i veliku propusnost betona. Najmanju vrijednost propusnosti pokazuje mješavina P<sub>4</sub>, s dodatkom silike u iznosu od 14,28%, koja je ugrađena zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom. Iako je poroznost ove mješavine u granicama poroznosti propusnih betona, izgleda da sama poroznost nije dovoljan uvjet za dobru propusnost betona.

Usporedbom mješavine P<sub>7</sub>, koja sadrži 30% letećeg pepela i koja je ugrađena vibriranjem na vibrostolu, i mješavine B<sub>6</sub>, koja ne sadrži nikakve dodatke i koja je ugrađena zbijanjem drvenom letvom, uočeno je da mješavina B<sub>6</sub> ima veću vrijednost propusnosti po obje metode.



Slika 5.20 Prikaz rezultata propusnosti

Osim utjecaja dodatka, metoda intenzivnog zbijanja također nepovoljno utječe na propusnost poroznih betona. Dugotrajno i jako nabijanje uzorka u kalupe uzrokuje dodatno drobljnje zrna i popunjavanje šupljina, što nepovoljno utječe na propusnost betona. Utjecaj zbijanja se vidi i na uzorcima P5 – P8, kod koji je ukupno vibriranje od 12 s dalo puno bolju propusnost.

Slika 5.21 prikazuje baze valjaka mješavina P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub> i P<sub>6</sub> na kojima su ispitivane propusnosti.

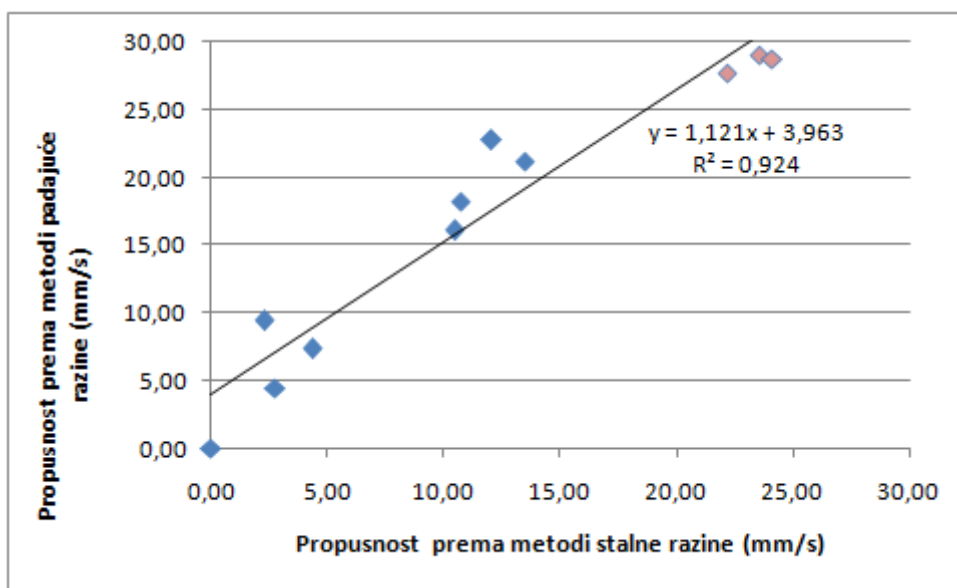
Mješavina P<sub>4</sub> sadrži 14,28% silike i ona je ugrađena zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom. Za razliku od mješavina P<sub>5</sub> i P<sub>6</sub>, uopće nije propuštala vodu. Mješavina P<sub>5</sub> (u sredini) ima najveću vodopropusnost zahvaljujući dodatku letećeg pepela i vibriranju.





Slika 5.21 Presjeci mješavina P<sub>6</sub>, P<sub>5</sub> i P<sub>4</sub>.

Na slici 5.22 prikazan je odnos propusnosti prema metodi padajuće razine stupca vode i prema metodi stalne razine stupca vode. Odnos je linearan, a korelacija je pozitivna. Koeficijent korelacije iznosi 0,961.



Slika 5.22 Odnos propusnosti prema metodi padajuće razine stupca vode i prema metodi stalne razine stupca vode.

### 5.2.3 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

U poglavlju 4.4.6 prikazan je princip rada hidrauličke preše korištene za ispitivanje tlačne čvrstoće mješavina poroznog betona s dodatkom silike i letećeg pepela.

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće prikazani su u tablici 3.3.

Mješavina  $P_4$  pokazuje najveću vrijednost tlačne čvrstoće od 41,83 MPa. Ta ista mješavina ujedno je potpuno zadržavala stupac vode iznad uzorka. Ugrađena je zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom, a upravo taj intenzitet zbijanja utjecao je na dobiveni rezultat. Postiže silu loma od 941,22 N, što je znatno više u odnosu na ostale mješavine poroznog betona.

Najmanju tlačnu čvrstoću od svih mješavina koje su izrađene uz mineralni dodatak, u iznosu od 16,43 MPa, pokazuje mješavina  $P_5$ , koja sadrži 10% letećeg pepela, a koja je ugrađena vibriranjem na vibrostolu. Ta ista mješavina ima i najveću propusnost, što je u skladu s rezultatima istraživanja [28].

Mješavina  $P_8$  ima drugu najmanju tlačnu čvrstoću, a to je ujedno mješavina s drugom najvećom poroznosti, koja je izgrađena uz dodatak letećeg pepela u iznosu od 15%.

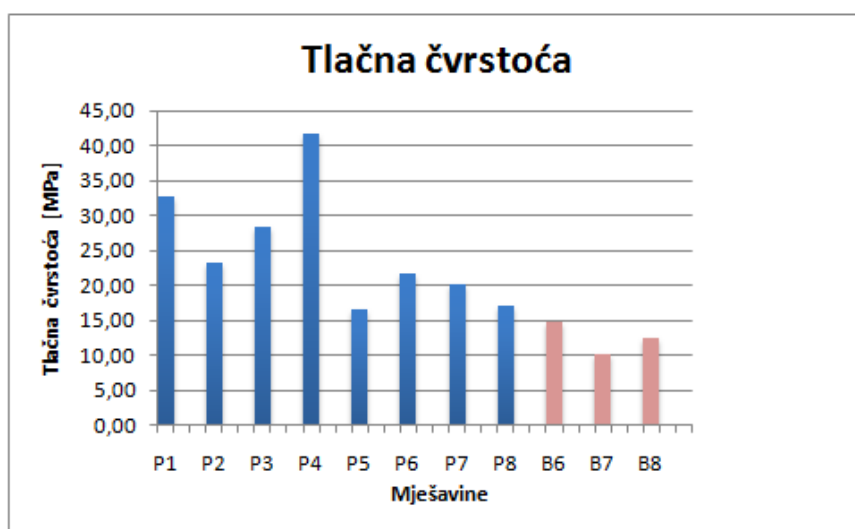
Mješavine  $B_6$  i  $B_8$ , koje ne sadrže nimalo dodataka, pokazuju znatno manje tlačne čvrstoće od mješavina koje sadrže određeni postotak dodataka. Na temelju tih rezultata, zaključuje se da dodaci silike i letećeg pepela utječu na povećanje tlačne čvrstoće.

Uspoređujući rezultate ovog ispitivanja, vidljivo je da veću tlačnu čvrstoću imaju mješavine od  $P_1$  -  $P_4$  koje su napravljene s dodatkom silike i koje su ugrađene zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom, dok mješavine  $P_5$  –  $P_8$ , mješavine s dodatkom letećeg pepela, koje su ugrađene vibriranjem na vibrostolu, pokazuju manju tlačnu čvrstoću. Sve postignute čvrstoće su znatno veće od čvrstoće polazne mješavine  $B_7$ .

Kao potvrdu istraživanja [28], može se uočiti da zamjenom cementa silikom od 10 – 15%, raste tlačna čvrstoća betona. Mješavine  $P_4$  i  $P_8$  imaju istu količinu veziva, ali ne i isti nivo čvrstoće. Međutim, treba napomenuti i da leteći pepeo kasnije razvija čvrstoće pa bi se tek nakon 90 dana mogla dati realnija slika odnosa čvrstoća među uzorcima. Razlika u rezultatima bi se vjerojatno smanjila, ali ne i izjednačila. Isto tako, zanimljivo bi bilo ispitati i uzorke koji bi se napravili u obrnutoj kombinaciji: leteći pepeo s intenzivnim zbijanjem i vibrirani uzorci s dodatkom silike.

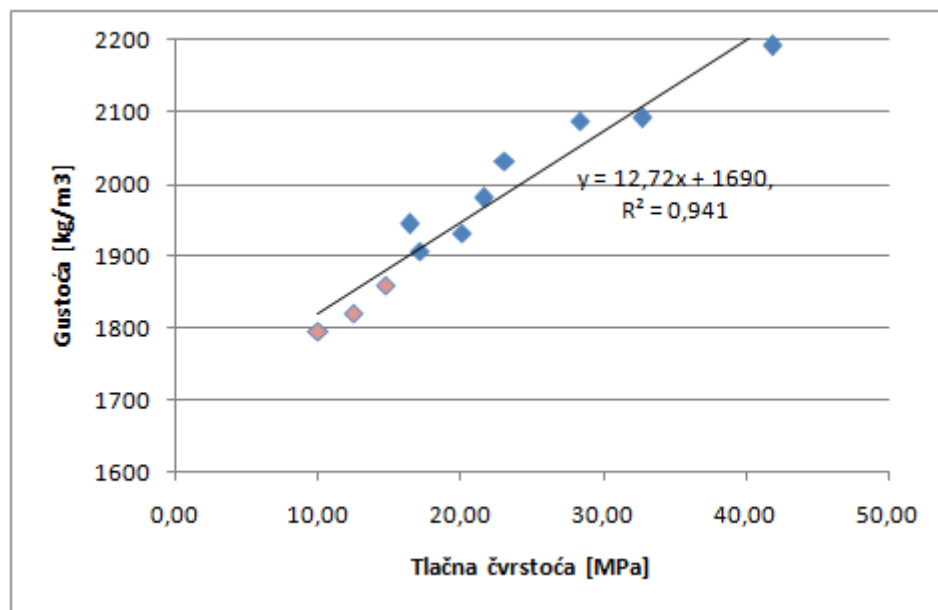
Tablica 3.3 Prikaz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće.

Oznaka	Masa [g]		Tlačna čvrstoća $f_c$ [MPa]		Sila loma $F$ [N]		Dimenzije			Volumen mm <sup>3</sup>	Gustoća kg/m <sup>3</sup>
							a [mm]	b [mm]	c [mm]		
P1	7072,6	7127,60	33,2	32,70	745,5	735,40	150,00	151,67	149,83	3408707	2090,998
	7172,7		35,1		789,7						
	7137,5		29,8		671						
P2	6881,3	6950,57	23,8	23,10	634,6	552,07	150,00	152,17	149,83	3419945	2032,362
	6964,7		23,8		534,4						
	7005,7		21,7		487,2						
P3	7114,9	7077,60	24,6	28,40	554	639,03	149,67	151,00	150,00	3390026	2087,772
	7129,3		35,3		794						
	6988,6		25,3		569,1						
P4	7625,3	7479,80	36,6	41,83	824,2	941,33	150,00	151,67	150,00	3412575	2191,835
	7491,4		45		1012,3						
	7322,7		43,9		987,5						
P5	6633,9	6588,97	16,2	16,43	340	361,40	150,00	151,00	149,67	3390026	1943,633
	6594,7		15,1		338,7						
	6538,3		18		405,5						
P6	6639,5	6756,47	20,7	21,63	466,5	487,30	150,00	151,67	150,00	3412575	1979,873
	6823,5		22,4		504,7						
	6806,4		21,8		490,7						
P7	6585,2	6575,50	19,5	20,13	437,8	452,20	150,00	151,33	150,00	3404925	1931,173
	6658,5		21,4		480,7						
	6482,8		19,5		438,1						
P8	6395,9	6502,40	15,5	17,13	349,6	385,60	150,00	151,67	150,00	3412575	1905,423
	6624,6		17,7		397,6						
	6486,7		18,2		409,6						
B6	6281,0	6332,00	14	14,77	315,8	332,30	150,00	150,00	151,33	3404925	1859,659
	6335,0		15,3		343,8						
	6380,0		15		337,3						
B7	6123,0	6123,67	8,6	10,03	192,8	225,47	150,00	150,00	151,67	3412575	1794,442
	6206,0		11,7		262,2						
	6042,0		9,8		221,4						
B8	6287,0	6317,67	11,9	12,50	267,8	281,40	150,00	150,00	154,33	3472425	1819,382
	6398,0		12,5		280,9						
	6268,0		13,1		295,5						



Slika 5.23 Prikaz tlačne čvrstoće mješavina

Na slici 5.24 vidljiv je linearan odnos gustoće i tlačne čvrstoće mješavina poroznog betona. Korelacija je pozitivna, a koeficijent korelacije iznosi 0.970.



Slika 5.24 Prikaz odnosa gustoće i tlačne čvrstoće

#### 5.2.4 Vlačna čvrstoća cijepanjem

Vlačna čvrstoća cijepanjem ispitana je u poglavlju 4.4.7., a rezultati su dani u tablici 3.4.

Tablica 3.4 Prikaz rezultata vlačne čvrstoće cijepanjem

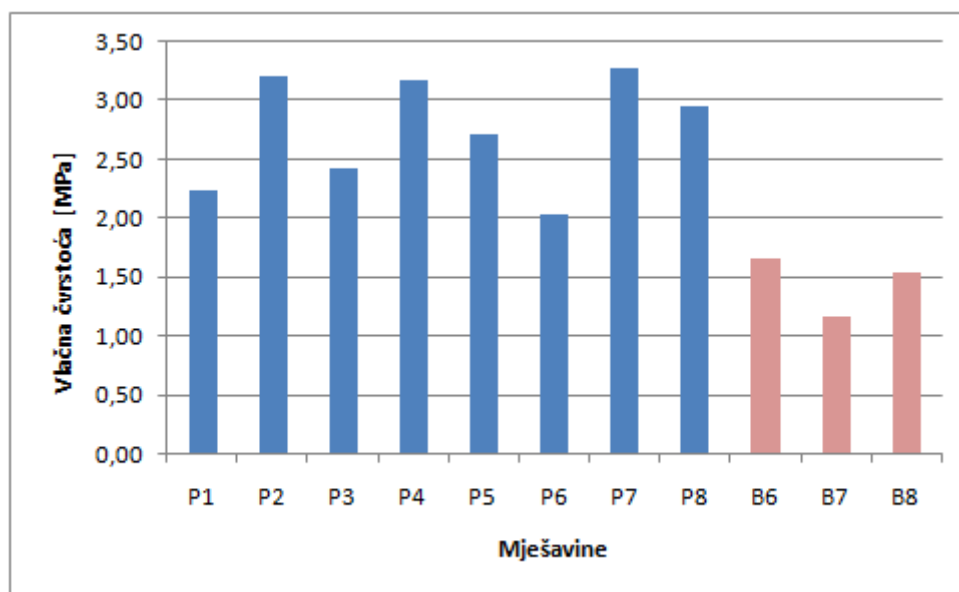
Oznaka	Masa (g)	Promjer (mm)	Visina (mm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	F (kN)	f <sub>ct</sub> (MPa)
P <sub>1</sub>	3554	105	210	1817,5	1955,5	77,3	2,23
P <sub>2</sub>	3582	105	195	1687,7	2122,5	103	3,20
P <sub>3</sub>	3561	105	199	1722,3	2067,6	79,7	2,43
P <sub>4</sub>	3579	106	187	1649,4	2169,9	99	3,18
P <sub>5</sub>	3522	106	205	1808,2	1947,8	92,7	2,72
P <sub>6</sub>	3418	105	204	1765,5	1935,9	68,4	2,03
P <sub>7</sub>	3341	105	190	1644,4	2031,8	74,1	3,28
P <sub>8</sub>	3473	105	211	1826,1	1901,8	82,3	2,96
B <sub>6</sub>	4218	113	229	2295,4	1837,6	67,3	1,66
B <sub>7</sub>	4058	113	229	2295,4	1767,9	47,3	1,16
B <sub>8</sub>	4210	113	230	2305,4	1826,1	62,8	1,54

Iz tablice je vidljivo da vrijednost vlačne čvrstoće varira od 1,54 MPa do 3,28 MPa, pri čemu mješavina P<sub>7</sub> ima najveću vlačnu čvrstoću cijepanjem iznosa 3,28 MPa. Ona sadrži 30% letećeg pepela i ugrađena je vibriranjem na vibrostolu.

Slijedi je mješavina P<sub>2</sub> koja ima vlačnu čvrstoću u iznosu od 3,20 MPa. Ta mješavina sadrži 20% silike i ugrađena je zbijanjem drvenom letvom s čekićem i betonskim valjkom.

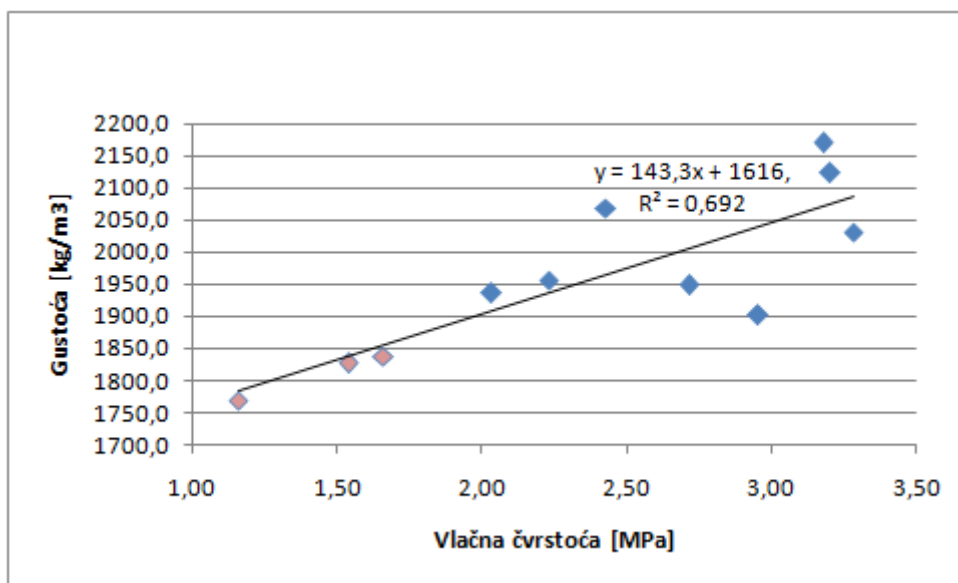
Najmanju vlačnu čvrstoću od mješavina koje sadrže dodatke, iznosa 2,03 MPa, ima mješavina P<sub>6</sub> koja sadrži 20% letećeg pepela i koja je ugrađena vibriranjem na vibrostolu.

Mješavine B<sub>6</sub> i B<sub>8</sub> pokazuju znatno manje vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem, u iznosu od 1,66 i 1,54 MPa. Na temelju toga, može se zaključiti da dodavanjem silike i letećeg pepela dolazi do povećanja vlačne čvrstoće cijepanjem.



Slika 5.25 Prikaz rezultata vlačne čvrstoće cijepanjem

Na slici 5.26 vidljiv je linearan odnos gustoće i vlačne čvrstoće mješavina poroznog betona. Korelacija je pozitivna, a koeficijent korelacije iznosi 0,832. Povećanjem gustoće povećava se i vlačna čvrstoća mješavina.



Slika 5.26 Prikaz odnosa gustoće i vlačne čvrstoće

### 5.2.5 Rezultati ispitivanja brzine infiltracije probnih ploča

Ispitana je brzina infiltracije probnih ploča nakon godinu dana, koje su napravljene za potrebe diplomskog rada [26].

Brzina infiltracije probnih ploča kreće se od 2,10 do 16,00 mm/s, što je vidljivo iz tablice 3.5.

Tablica 3.5 Prikaz rezultata ispitivanja brzine infiltracije probnih ploča nakon godinu dana

Oznaka	Podloga	Probno ispitivanje		Stvarno ispitivanje			
		Količina vode	Proteklo vrijeme	Količina vode	Proteklo vrijeme	Brzina infiltracije	
		(l)	(s)	(l)	(s)	(mm/sat)	(mm/s)
B <sub>6-1</sub>	Zemljana	3,63	4,51	18,14	15,53	57630	16,0
B <sub>7-2</sub>	Travnata	3,63	5,10	18,14	19,36	46229	12,8
B <sub>7-3</sub>	Šljunčana	3,63	5,22	18,14	26,57	33684	9,4
B <sub>7-1</sub>	Zemljana	3,63	23,66	18,14	117,56	7613	2,1

Slika 5.27 prikazuje da najveću brzinu infiltracije ima ploča B<sub>6-1</sub>, frakcije 11,2 – 16 mm, koja se nalazi na zemljanoj podlozi, dok najmanju brzinu infiltracije pokazuje probna ploča B<sub>7-1</sub>, frakcije 8 – 16 mm, koja se također nalazi na zemljanoj podlozi.

Tablica 3.6 prikazuje rezultate ispitivanja brzine infiltracije probnih ploča prije godinu dana te se uočava da su sve brzine infiltracije manje u odnosu na prošlogodišnja

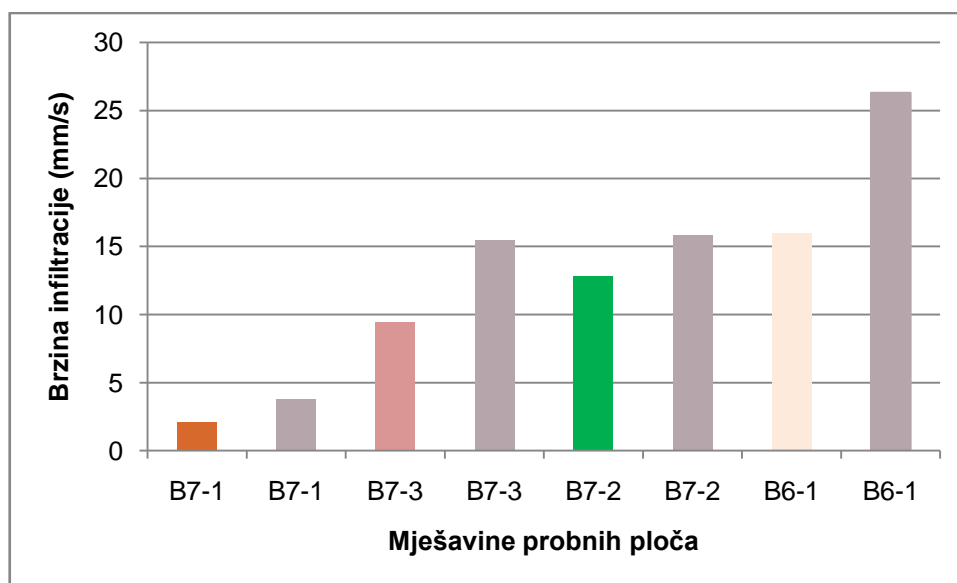
ispitivanja, ponajprije zbog začepljenja pora zbog nečistoća koje se talože tijekom vremena.

Usporede li se rezultati ispitivanja brzine infiltracije probnih ploča neposredno nakon izrade i nakon godinu dana, može se primijetiti da najveću varijaciju pokazuje ploča B<sub>6-1</sub> koja je izrađena na zemljanoj podlozi, dok se brzina infiltracije ploče B<sub>7-1</sub> najmanje promijenila. Prije godinu dana iznosila je 3,8 mm/s, a nakon godinu dana njena vrijednost iznosi 2,1 mm/s. Važno je napomenuti da je ova ploča također izrađena na zemljanoj podlozi.

Brzina infiltracije ploče B<sub>7-2</sub>, koja je izrađena na travnatoj podlozi, smanjila se s 15,8 mm/s na 12,8 mm/s, dok se vrijednost brzine infiltracije ploče B<sub>7-3</sub>, izrađene na šljunčanoj podlozi, smanjila s 15,5 mm/s na 9,4 mm/s.

Tablica 3.6 Prikaz rezultata ispitivanja brzine infiltracije probnih ploča prije godinu dana

Oznaka	Podloga	Probno ispitivanje		Stvarno ispitivanje			
		Količina vode	Proteklo vrijeme	Količina vode	Proteklo vrijeme	Brzina infiltracije	
		(l)	(s)	(l)	(s)	(mm/sat)	(mm/s)
B <sub>6-1</sub>	Zemljana	3,63	3,06	18,14	9,45	94708	26,3
B <sub>7-2</sub>	Travnata	3,63	4,97	18,14	15,74	56861	15,8
B <sub>7-3</sub>	Šljunčana	3,63	4,71	18,14	15,99	55972	15,5
B <sub>7-1</sub>	Zemljana	3,63	14,54	18,14	66,03	13554	3,8



Slika 5.27 Prikaz rezultata brzine infiltracije probnih ploča neposredno nakon izrade (sivo) i nakon godinu dana

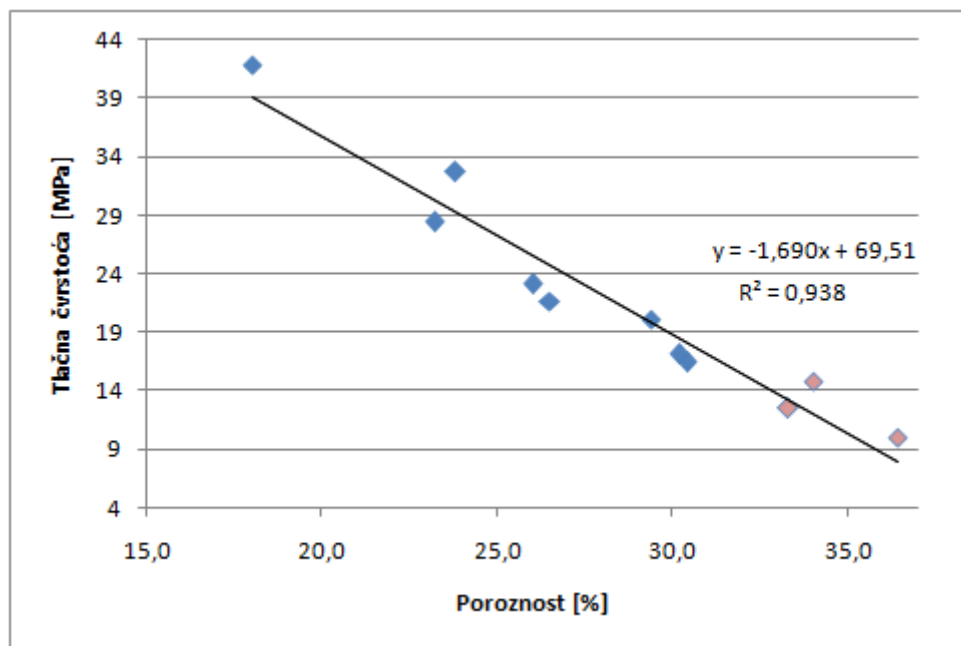
Ploče se nalaze na terenu pored fakultetskog parkirališta te nisu izložene prometu. Jasno je da bi ploče opterećene prometom imale puno veće začepljenje pora od ispitnih ploča. Ovo ukazuju na potrebu održavanja ovakve vrste betona jer mu tijekom vremena opada propusnost, što mu je glavna odlika.



## 6 OVISNOSTI IZMEĐU SVOJSTAVA POROZNOG BETONA

### 6.1 Veza između tlačne čvrstoće i poroznosti

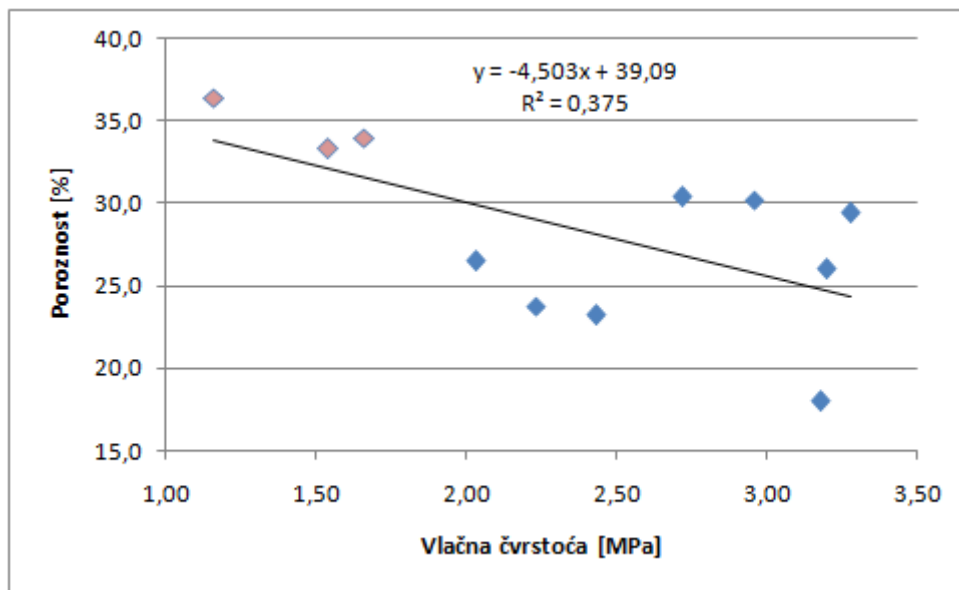
Slika 6.1 prikazuje odnos tlačne čvrstoće i poroznosti, odnosno ukupnog dijela šupljina. Vidljivo je da se povećanjem tlačne čvrstoće smanjuje poroznost i obrnuto. Odnos je gotovo linearan, korelacija je negativna, a koeficijent korelacije iznosi 0,969.



Slika 6.1 Odnos između tlačne čvrstoće i poroznosti

### 6.2 Veza između vlačne čvrstoće cijepanjem i poroznosti

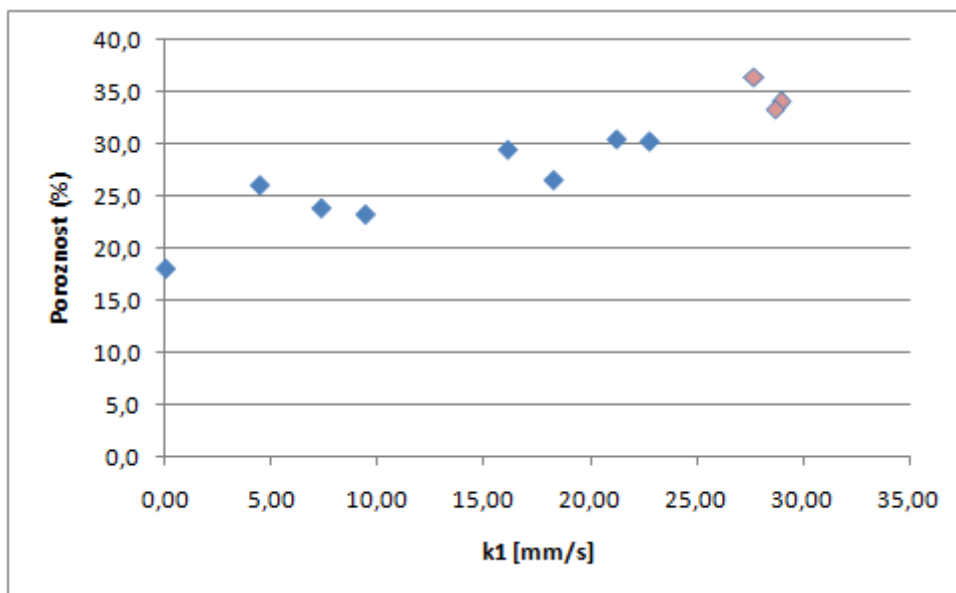
Na slici 6.2 prikazan je odnos između vlačne čvrstoće cijepanjem i poroznosti. Može se uočiti da su točke dosta raspršene, korelacija je negativna, a koeficijent korelacije iznosi 0,612.



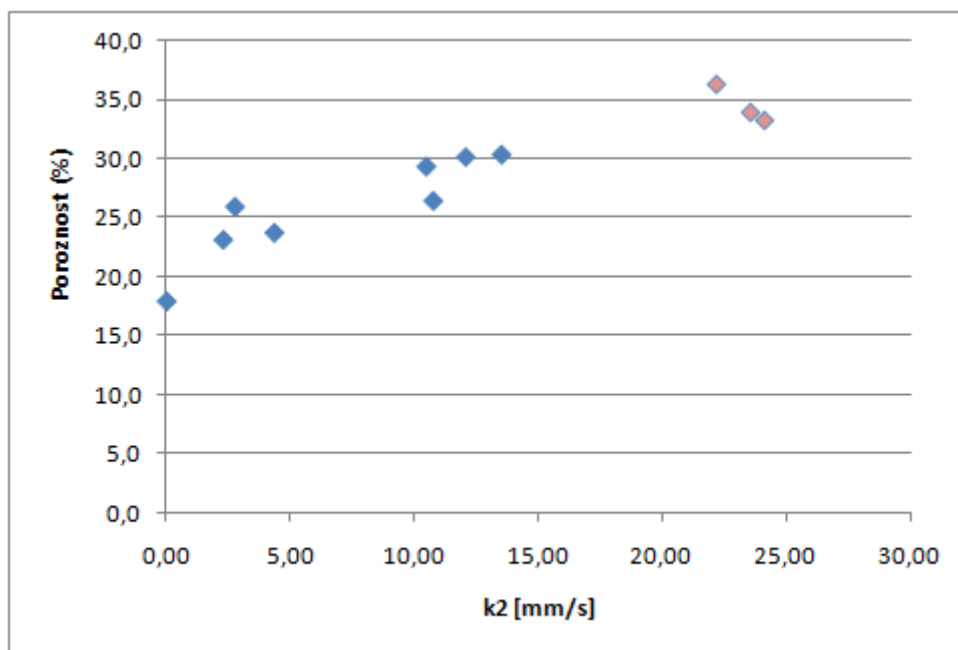
Slika 6.2 Veza između vlačne čvrstoće i poroznosti

### 6.3 Veza između poroznosti i propusnosti

Na slici 6.3 prikazana je veza između poroznosti i koeficijenta propusnosti dobivenog prema metodi padajuće razine stupca vode ( $k_1$ ), a na slici 6.4 prikazan je odnos između poroznosti i koeficijenta propusnosti dobivenog prema metodi stalne razine vode ( $k_2$ ). Može se uočiti da s porastom ukupne poroznosti, raste i propusnost.



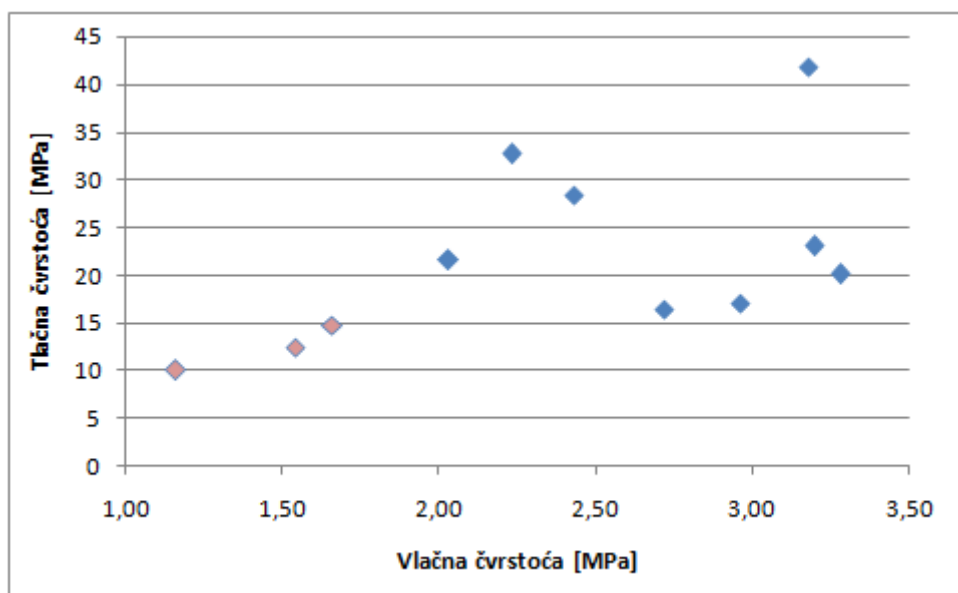
Slika 6.3 Odnos između poroznosti i koeficijenta propusnosti dobivenog prema metodi padajuće razine vode ( $k_1$ )



Slika 6.4 Odnos između poroznosti i koeficijenta propusnosti dobivenog prema metodi stalne razine vode ( $k_2$ )

#### 6.4 Veza između tlačne i vlačne čvrstoće cijepanjem

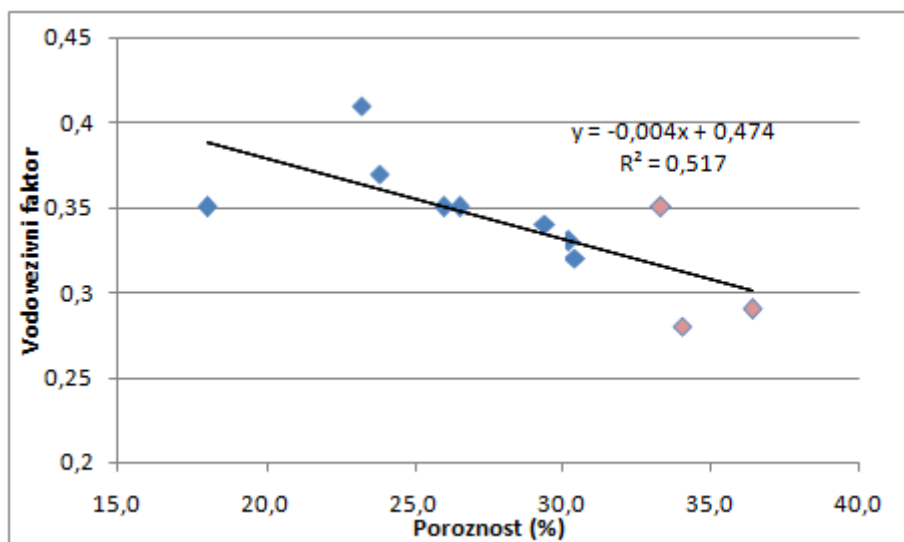
Slika 6.5 prikazuje odnos između tlačne i vlačne čvrstoće cijepanjem. Možemo primijetiti da su podaci vrlo raspršeni, ali i da se povećanjem tlačne čvrstoće povećava i vlačna čvrstoća.



Slika 6.5 Veza između tlačne i vlačne čvrstoće cijepanjem

## 6.5 Veza između vodovezivnog faktora i poroznosti

Na slici 6.6 prikazan je odnos između vodovezivnog faktora i poroznosti. Korelacija je negativna, a koeficijent korelacije iznosi 0,719. Odnos je obrnuto proporcionalan, odnosno povećanjem vodovezivnog faktora, smanjuje se vrijednost poroznosti i obratno.



Slika 6.6 Veza između vodovezivnog faktora i poroznosti

## 7 ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme, porozni beton dobiva sve važniju ulogu u građevinarstvu, posebno prilikom izgradnje pločnika i pješačkih staza, kolničkih prilaza, parkirališta, trgova, staza i puteva u prirodnom okruženju, retencijskih polja, akustičnih panela (bukobrani), područja uz plaže i bazene te dekorativnih betona.

Osnovna karakteristika poroznog betona je velika vodopropusnost, uz istovremeno zadovoljavajuću vrijednost tlačne čvrstoće. Uz usporedbu poroznih betona s mineralnim dodatkom i bez dodataka, osiguranje ovih uvjeta bio je osnovni cilj ovog istraživanja. U tu svrhu, napravljeno je 8 mješavina poroznog betona.

Prve 4 mješavine napravljene su s dodatkom silike, a preostale 4 s dodatkom letećeg pepela. Najprije je ispitivana konzistencija betona u svježem stanju, i to metodom slijeganja i metodom oblikovanja kuglice dlanom. Niti jedna mješavina nije imala slijeganje. Zadovoljavajuća konzistencija betona potvrđena je drugom metodom, budući da je kod svih mješavina bilo moguće oblikovati kuglicu dlanovima.

U očvrslom stanju ispitani su poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća cijepanjem. Poroznost ove vrste betona kreće se u rasponu od 11 – 35% te uočavamo da sve mješavine zadovoljavaju taj kriterij. Najveću poroznost pokazuje mješavina P<sub>5</sub> koja je napravljena uz dodatak letećeg pepela u iznosu od 10%. Međutim, ta vrijednost i dalje je manja od mješavina B<sub>6</sub> i B<sub>8</sub> koje pokazuju veću poroznost te su napravljene bez dodatka letećeg pepela, a ugrađene su zbijanjem drvenom letvom i vibriranjem na vibrostolu. Primijećeno je da mješavine koje su napravljene uz dodatak letećeg pepela i koje su ugrađene vibriranjem na vibrostolu imaju veću vrijednost poroznosti od mješavina napravljenih uz dodatak silike i ugrađenih zbijanjem drvenom letvom s čekićem. Vidljiv je linearan odnos gustoće i poroznosti, korelacija je negativna, a koeficijent korelacije iznosi 0,992.

Propusnost betona ispitana je pomoću dvije metode, metode padajuće razine stupca vode i metode stalne razine stupca vode. Najveću propusnost po metodi stalne razine stupca vode, od mješavina napravljenih uz dodatak, pokazuje mješavina P<sub>5</sub>, napravljena uz dodatak 10% letećeg pepela te ugrađena vibriranjem na vibrostolu, dok je to, po metodi padajuće razine stupca vode, mješavina P<sub>8</sub>. Veću propusnost od njih, po obje navedene metode, pokazuju mješavine B<sub>6</sub> i B<sub>8</sub> koje ne sadrži nikakve dodatke. Moguće je primijetiti da mješavine koje

su napravljene uz dodatak letećeg pepela i koje su ugrađene vibriranjem na vibrostolu, imaju veću vrijednost propusnosti od mješavina koje su izrađene uz dodatak silike i koje su ugrađene zbijanjem drvenom letvom s čekićem. Zanimljivo je primijetiti da se mješavina P<sub>4</sub>, koja sadrži 14,28% silike i koja je ugrađena zbijanjem drvenom letvom s čekićem, ponaša poput standardnih betona. To je mješavina sa zadovoljavajućom poroznosti, ali potpuno zadržava stupac vode iznad ugrađenog uzorka. To se može pripisati prejakom zbijanju prilikom ugradnje drvenom letvom s čekićem, koje je uzrokovalo. Odnos propusnosti prema padajućoj razini stupca vode i propusnosti prema stalnoj razini stupca vode je linearan. Korelacija je pozitivna, a koeficijent korelacije iznosi 0,961.

Sve mješavine pokazuju dobru tlačnu čvrstoću i ona se kreće u rasponu od 16,43 MPa do 41,83 MPa. Očekivano, najveću vrijednost tlačne čvrstoće pokazuje mješavina P<sub>4</sub>. Mješavine B<sub>6</sub> i B<sub>8</sub> pokazuju manje vrijednosti tlačne čvrstoće pa zaključujemo da dodavanjem mineralnih dodataka poput silike i letećeg pepela, dolazi do povećanja tlačne čvrstoće. Isto tako, veću tlačnu čvrstoću pokazuju mješavine koje su ugrađene zbijanjem drvenom letvom s čekićem od mješavina ugrađenih vibriranjem na vibrostolu. Sve mješavine sa dodacima, postigle su veću čvrstoću u odnosu na polaznu mješavinu B<sub>7</sub>, ali uz manju propusnost i poroznost. Odnos tlačne čvrstoće i gustoće je gotovo linearan, uz koeficijent korelacije 0,970.

Najveću vrijednost vlačne čvrstoće cijepanjem pokazuje mješavina P<sub>7</sub>, koja je izrađena od 30% letećeg pepela te ugrađena vibriranjem na vibrostolu. Najmanju vlačnu čvrstoću od mješavina koje su izrađene uz dodatak pokazuje mješavina P<sub>6</sub> koja sadrži 20% letećeg pepela i ugrađena je vibriranjem na vibrostolu. Mješavine B<sub>6</sub> i B<sub>8</sub> pokazuju manje vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem, iz čega zaključujemo da mineralni dodatak dovodi do povećanja vlačne čvrstoće. Povećanjem vlačne čvrstoće, povećava se i tlačna čvrstoća.

Ispitana je brzina infiltracije probnih ploča nakon godinu dana. Najveću vrijednost brzine infiltracije pokazuje probna ploča B<sub>6-1</sub>, frakcije 11,2 – 16 mm, koja je postavljena na zemljanu podlogu. Najmanju vrijednost brzine infiltracije ima probna ploča B<sub>7-1</sub>, frakcije 8 – 16 mm, koja je također postavljena na zemljanu podlogu. Međutim, ove vrijednosti su smanjene u odnosu na godinu prije, što nam ukazuje na tipičan problem poroznog betona, a to je da se pore vremenom zapune i na taj način se smanji infiltracija. Time se ukazuje na potrebu održavanja propusnosti ove vrste betona.

## 8 LITERATURA

- [1] <https://ru.scribd.com/doc/289079514/Majcen-Ivan-1>
- [2] <http://continuum-projektiranje.hr/sastav-betona/>
- [3] V. Ukrainczyk: *Beton, Struktura, svojstva, tehnologija*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1994.
- [4] <http://www.sakrete.com/products/Portland-Cement.cfm>
- [5] [http://www.gf.unmo.ba/resources/1/Downloads/Osnove%20tehnologije%20betona/Komponente%20betona%20\(Agregat%20i%20Voda\)%20\[Na%C4%8Din%20kompatibilnosti\].pdf](http://www.gf.unmo.ba/resources/1/Downloads/Osnove%20tehnologije%20betona/Komponente%20betona%20(Agregat%20i%20Voda)%20[Na%C4%8Din%20kompatibilnosti].pdf)
- [6] L. K. Crouch, P. E., Jordan Pitt, Ryan Hewitt: *Aggregate effect on pervious portland cement concrete static moduls of elasicity*, Journal of Materials in Civil Engineering, 2007
- [7] Tennis, P. D., Leming, M. L., Akers, D.J.: *Pervious concrete pavements, Technicalreport*, EB302.02. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National ReadyMixedConcreteAssociation, SilverSpring, Maryland (2004), pp. 14
- [8] I. Križanović, J. Begić: *Porozni betonski kolnik*, Građevinski fakultet Zagreb, 2009.
- [9] [http://www.tectonica-online.com/products/2687/concrete\\_high-permeability\\_hydromedia/](http://www.tectonica-online.com/products/2687/concrete_high-permeability_hydromedia/)
- [10] <http://www.betoni.hr/Beton/Detalj/ArtMID/864/ArticleID/36/Propusni-beton>
- [11] <http://resources.troweltradessupply.com/permeable-pavers-vs-porous-asphalt-whats-the-difference>
- [12] <http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete%28civil%29-volume4/47.pdf>
- [13] M. Vujica: *Samozbijajući ekološki održivi beton*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [14] <http://www.perviouspavement.org/design/hydrologicaldesign.html>
- [15] D. Bjegović, N. Štirmer: *Teorija i tehnologija betona*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015.
- [16] <http://www.exportersindia.com/vknbpopvtltd/rice-husk-ash-rha-trichy-india-228817.htm>
- [17] <https://sourceable.net/pervious-concrete-offers-host-benefits/>
- [18] <http://www.stevensonconcrete.co.nz/concrete/pervious-concrete/>

- [19] Manoj Nallanathel, B. Ramesh, Srikanth S: *Partial Replacement of Cement in Pervious Concrete*, Dept. of Civil Engineering, Saveetha School of Engineering, Saveetha University, Chennai, 2016.
- [20] K. Sathish Kumar and S. Dilli Babu: *Experimental Study on Partial Replacement of Cement by Palm Ash*, Department of Civil Engineering, Bharath University, 2015.
- [21] <http://www.cemex.hr/CEMII-B-S42-5N.aspx>
- [22] <https://repozitorij.gfos.hr/islandora/object/gfos%3A541/datastream/PDF/view>
- [23] Marina Alagušić, Filip Lavriv: *Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2010.
- [24] <http://www.ekokuce.com/materijali/beton-sa-letecim-pepelom>
- [25] N. Torić, I. Boko, B. Peroš: *Smanjenje mehaničkih svojstava betona velike čvrstoće nakon požara*, Građevinar 63 (2011) 12, 1033-1041.
- [26] I. Brnas: *Utjecaj sastava i načina ugradnje na svojstva poroznih betona*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2016.
- [27] M. Felja, K. Ćosić, I. Netinger: *Primjena poroznog betona u kolničkim konstrukcijama*, 2013.
- [28] Prof. dr. K. B. Parikh, M. A. Shaikh, Adil A. Haji: *Experimental investigation of Mineral Admixtures in Pervious Concrete: A Review*, International Journal of Scientific and Research Publications, 2016.
- [29] [http://info.grad.hr/res/gf\\_osoblje/1120041065/doc/1.%20mehanika%20tla%20i%20stijena%20-%20prediplomski/052.5.\\_predavanje\\_mt.pdf](http://info.grad.hr/res/gf_osoblje/1120041065/doc/1.%20mehanika%20tla%20i%20stijena%20-%20prediplomski/052.5._predavanje_mt.pdf)